

Universidad Pública de Navarra
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS AGRONOMOS

Nafarroako Unibertsitate Publikoa
NEKAZARITZAKO INGENIARIEN
GOI MAILAKO ESKOLA TEKNIKO



TRABAJO FIN DE MASTER

Dinámica del flujo preferencial de agua en suelos agrícolas de Navarra

Presentado por:

IBAN ITURRIA AGUINAGA

MASTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA AGRONÓMICA

AGRADECIMIENTOS:

A mi tutor Rafael Giménez y cotutor Miguel Ángel Campo por toda la ayuda, atención y conocimientos prestados, y a todos esos compañeros que me han ayudado durante la realización de este trabajo.

RESUMEN

El flujo preferencial genera un movimiento rápido del agua en el suelo a través de grietas y macroporos. Esta rápida infiltración causa inconvenientes como, imprecisión de modelos hidrológicos, contaminación de acuíferos, pérdidas de agua en riegos etc.

El objetivo de este trabajo es cuantificar, en suelos laboreados, la presencia de grietas y macroporos responsables del movimiento rápido del agua; y su variación temporal frente a diferentes contenidos de humedad del suelo. El estudio se ha llevado a cabo en la finca de prácticas de la UPNA, se han preparado 3 zonas aradas con aperos diferentes (chisel, vertedera y vertedera + rastra con molón). La mitad de cada zona se ha sometido a lluvias mientras que la otra ha permanecido seca.

Los resultados muestran una gran variabilidad de los flujos preferenciales entre los ensayos y una gran influencia de la suela de labor en su distribución en profundidad.

ABSTRACT

The preferential flow generates a rapid movement of water in the soil through cracks and macropores. This rapid infiltration causes inconveniences such as imprecision of hydrological models, contamination of aquifers, loss of water in irrigation, etc.

The objective of this work is to quantify, in ground soils, the presence of cracks and macropores responsible for the rapid movement of water; And its temporal variation in relation to different soil moisture contents. The study has been carried out in the practice farm of the UPNA, 3 plowed areas have been prepared with different implements (chisel, landfill and landfill + harrow with hammer). Half of each area has been rained while the other has remained dry.

The results show a great variability of the preferential flows and a great influence of the work sole in its distribution in depth.

ÍNDICE

Resumen	- 1 -
Abstract.....	- 2 -
Índice de figuras.....	- 1 -
Índice de tablas	- 4 -
1. Introducción y antecedentes	- 1 -
2. Metodología.....	- 2 -
2.1 Distribución de zonas y asignación de parcelas.....	- 3 -
2.2 Calibración del simulador de lluvia	- 5 -
2.3 Metodología empleada para realizar los ensayos	- 6 -
2.4 Procesado de imágenes	- 7 -
2.4.1 Georreferenciación de las imágenes.....	- 8 -
2.4.2 Obtención del Clipper:	- 9 -
2.4.3 Obtención de la imagen binaria:.....	- 10 -
2.4.4 Obtención de estadísticas	- 12 -
3. Resultados.....	- 15 -
4. Conclusiones	- 21 -
5. Bibliografía	- 22 -
Anexo 1: Resultados: Imágenes binarias	- 27 -
Zona seca	- 27 -
Zona húmeda	- 39 -
Anexo 2: Resultados gráficos de los tratamientos.....	- 51 -
Anexo 3: Aplicación de importación de tablas.....	- 79 -
Anexo 4: Datos de humedad de los ensayos	- 89 -

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del ensayo en la finca de prácticas de la UPNA.....	- 2 -
Figura 2. Distribución de los diferentes pases con los aperos.	- 3 -
Figura 3. Distribución de la zona húmeda y la zona seca.	- 4 -
Figura 4. Distribución de parcelas y número de ensayo.	- 4 -
Figura 5. Distribución de los recipientes para la calibración del simulador de lluvia.	- 5 -
Figura 6. Ejemplo de una imagen tomada en campo.	- 8 -
Figura 7. Ejemplo de georreferenciación de una imagen.	- 9 -
Figura 8. Ejemplo de una imagen georreferenciada.....	- 9 -

Figura 9. Ejemplo de un clipper de una imagen.....	- 10 -
Figura 10. Ejemplo de imagen binaria.	- 11 -
Figura 11. Ejemplo de comprobación de la imagen binaria sobre el clipper.....	- 11 -
Figura 12. Ejemplo de la malla para analizar las estadísticas.	- 12 -
Figura 13. Ejemplo de los cortes en el perfil de suelo (en negro flujo preferencial, en blanco la matriz del suelo).....	- 15 -
Figura 14. Media de la zona seca	- 18 -
Figura 15. Media de la zona húmeda.....	- 16 -
Figura 16. Media total.....	- 16 -
Figura 17. Ejemplo de resultado individual del chisel en zona húmeda (también disponible en el Anexo 2).	- 17 -
Figura 18. SD0_1	Figura 19. SD0_2.....- 27 -
Figura 20. SD0_3	Figura 21. SD0_4.....- 28 -
Figura 22. CS0_1	Figura 23. CS0_2- 28 -
Figura 24. CS0_3	Figura 25. CS0_4- 29 -
Figura 26. CS0_5	Figura 27. CS0_6- 29 -
Figura 28. CS1_1	Figura 29. CS1_2- 29 -
Figura 30. CS1_3	Figura 31. CS1_4- 29 -
Figura 32. CS2_1	Figura 33. CS2_2- 30 -
Figura 34. CS2_3	Figura 35. CS2_4- 30 -
Figura 36. CS3_1	Figura 37. CS3_2- 30 -
Figura 38. CS3_3	Figura 39. CS3_4- 31 -
Figura 40. CS4_1	Figura 41. CS4_2- 31 -
Figura 42. CS4_3	Figura 43. CS4_4- 31 -
Figura 44. VS0_1	Figura 45. VS0_2.....- 32 -
Figura 46. VS0_3	Figura 47. VS0_4.....- 32 -
Figura 48. VS0_5	Figura 49. VS0_6.....- 32 -
Figura 50. VS1_1	Figura 51. VS1_2.....- 33 -
Figura 52. VS1_3	Figura 53. VS1_4.....- 33 -
Figura 54. VS2_1	Figura 55. VS2_2.....- 33 -
Figura 56. VS2_3	Figura 57. VS2_4.....- 34 -
Figura 58. VS3_1	Figura 59. VS3_2.....- 34 -
Figura 60. VS3_3	Figura 61. VS3_4.....- 34 -
Figura 62. VS4_1	Figura 63. VS4_2.....- 35 -
Figura 64. VS4_3	Figura 65. VS4_4.....- 35 -
Figura 66. RS0_1	Figura 67. RS0_2- 35 -
Figura 68. RS0_3	Figura 69. RS0_4- 36 -
Figura 70. RS0_5	Figura 71. RS0_6- 36 -
Figura 72. RS1_1	Figura 73. RS1_2- 36 -
Figura 74. RS1_3	Figura 75. RS1_4- 37 -
Figura 76. RS2_1	Figura 77. RS2_2- 37 -
Figura 78. RS2_3	Figura 79. RS2_4- 37 -
Figura 80. RS3_1	Figura 81. RS3_2- 38 -
Figura 82. RS3_3	Figura 83. RS3_4- 38 -
Figura 84. RS4_1	Figura 85. RS4_2- 38 -

Figura 86. RS4_3	Figura 87. RS4_4- 39 -
Figura 88. CP1_1	Figura 89. CP1_2.....- 39 -
Figura 90. CP1_3	Figura 91. CP1_4.....- 40 -
Figura 92. CP2_1	Figura 93. CP2_2.....- 40 -
Figura 94. CP2_3	Figura 95. CP2_4.....- 40 -
Figura 96. CP3_1	Figura 97. CP3_2.....- 41 -
Figura 98. CP3_3	Figura 99. CP3_4.....- 41 -
Figura 100. CP4_1	Figura 101. CP4_2.....- 41 -
Figura 102. VP1_1	Figura 103. VP1_2- 42 -
Figura 104. VP1_3	Figura 105. VP1_4- 42 -
Figura 106. VP2_1	Figura 107. VP2_2- 42 -
Figura 108. VP2_3	Figura 109. VP2_4- 43 -
Figura 110. VP3_1	Figura 111. VP3_2- 43 -
Figura 112. VP3_3	Figura 113. VP3_4- 43 -
Figura 114. VP4_1	Figura 115. VP4_2- 44 -
Figura 116. VP4_3	Figura 117. VP4_4- 44 -
Figura 118. RP1_1	Figura 119. RP1_2.....- 44 -
Figura 120. RP1_3	Figura 121. RP1_4.....- 45 -
Figura 122. RP2_1	Figura 123. RP2_2.....- 45 -
Figura 124. RP2_3	Figura 125. RP2_4.....- 45 -
Figura 126. RP3_1	Figura 127. RP3_2.....- 46 -
Figura 128. RP3_3	Figura 129. RP3_4.....- 46 -
Figura 130. RP4_1	Figura 131. RP4_2.....- 46 -
Figura 132. RP4_3	Figura 133. RP4_4.....- 47 -
Figura 134. Resultados individuales del ensayo SD0.- 52 -	
Figura 135. Resultados individuales del ensayo CS0.....- 52 -	
Figura 136. Resultados individuales del ensayo VS0.- 53 -	
Figura 137. Resultados individuales del ensayo RS0.- 53 -	
Figura 138. Resultados individuales del ensayo CS1.....- 54 -	
Figura 139. Resultados individuales del ensayo VS1.- 54 -	
Figura 140. Resultados individuales del ensayo RS1.- 55 -	
Figura 141. Resultados individuales del ensayo CS2.....- 55 -	
Figura 142. Resultados individuales del ensayo VS2.- 56 -	
Figura 143. Resultados individuales del ensayo RS2.- 56 -	
Figura 144. Resultados individuales del ensayo CS3.....- 57 -	
Figura 145. Resultados individuales del ensayo VS3.- 57 -	
Figura 146. Resultados individuales del ensayo RS3.- 58 -	
Figura 147. Resultados individuales del ensayo CS4.....- 58 -	
Figura 148. Resultados individuales del ensayo VS4.- 59 -	
Figura 149. Resultados individuales del ensayo RS4.- 59 -	
Figura 150. Resultados individuales del ensayo CP1.- 60 -	
Figura 151. Resultados individuales del ensayo VP1.- 60 -	
Figura 152. Resultados individuales del ensayo RP1.- 61 -	
Figura 153. Resultados individuales del ensayo CP2.- 61 -	
Figura 154. Resultados individuales del ensayo VP2.- 62 -	

Figura 155. Resultados individuales del ensayo RP2.	- 62 -
Figura 156. Resultados individuales del ensayo CP3.	- 63 -
Figura 157. Resultados individuales del ensayo VP3.	- 63 -
Figura 158. Resultados individuales del ensayo RP3.	- 64 -
Figura 159. Resultados individuales del ensayo CP4.	- 64 -
Figura 160. Resultados individuales del ensayo VP4.	- 65 -
Figura 161. Resultados individuales del ensayo RP4.	- 65 -
Figura 162. Resultados individuales de la zona seca del chisel.	- 66 -
Figura 163. Resultados individuales de la zona seca de la vertedera.	- 66 -
Figura 164. Resultados individuales de la zona seca de la rastra.	- 67 -
Figura 165. Resultados individuales de la zona húmeda del chisel.	- 67 -
Figura 166. Resultados individuales de la zona húmeda de la vertedera.	- 68 -
Figura 167. Resultados individuales de la zona húmeda de la rastra.	- 68 -
Figura 168. Resultados individuales del chisel.	- 69 -
Figura 169. Resultados individuales de la vertedera.	- 69 -
Figura 170. Resultados individuales de la rastra.	- 70 -
Figura 171. Resultados del ensayo S0.	Figura 172. Resultados del ensayo S1. - 71 -
Figura 173. Resultados del ensayo S2.	Figura 174. Resultados del ensayo S3. - 71 -
Figura 175. Resultados del ensayo S4.	Figura 176. Resultados del ensayo P1. - 72 -
Figura 177. Resultados del ensayo S4.	Figura 178. Resultados del ensayo P1. - 72 -
Figura 179. Resultados del ensayo P4.	Figura 180. Resultados medios de la zona
seca (S).	- 73 -
Figura 181. Resultados medios de la zona húmeda (P).	Figura 182. Resultados medios tales. - 73 -
Figura 183. Resultados evolutivos del chisel en seco.	Figura 184. Resultados evolutivos del chisel
en húmedo.	- 74 -
<i>Figura 185. Resultados evolutivos de la vertedera en seco.</i>	<i>Figura 186. Resultados evolutivos de</i>
<i>la vertedera en húmedo.</i>	<i>la vertedera en húmedo.</i>
<i>Figura 187. Resultados evolutivos de la rastra en seco.</i>	<i>Figura 188. Resultados evolutivos de la rastra</i>
<i>en húmedo.</i>	<i>en húmedo.</i>
Figura 189. Apariencia de la aplicación frente al usuario.	- 79 -
Figura 190. Captura de pantalla de la tabla Excel con los nombres de las tablas.	- 80 -
Figura 191. Código de inicio de programa.	- 81 -
Figura 192. Código de introducción de los nombres de las imágenes en el segundo combo box. ...	- 81 -
Figura 193. Código del botón aceptar.	- 82 -
Figura 194. Código de la subrutina "EstadisticasFilas".	- 82 -
Figura 195. Código de la subrutina "EstadisticasFilasTodas".	- 83 -
Figura 196. Código de la subrutina "ImportarTabla".	- 84 -
Figura 197. Código de la subrutina "CalculoEstadisticas".	- 86 -

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Análisis de suelo de la zona de estudio (2015).	- 2 -
Tabla 2. Cronología de los ensayos.	- 7 -
Tabla 3. Nomenclatura de los tratamientos.	- 13 -

Tabla 4. Tasa de infiltración básica de diferentes tratamientos del estudio Mezkiritz (2012).....	- 19 -
Tabla 5. Humedad del suelo en cada ensayo.....	- 18 -
Tabla 6. Nomenclatura de cada tratamiento.....	- 27 -
Tabla 7. Nomenclatura de cada tratamiento.....	- 51 -
Tabla 8. Humedad del suelo en ensayos de la zona seca.	- 89 -
Tabla 9. Humedad del suelo en ensayos de la zona de precipitación.	- 89 -

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Para abordar estudios de procesos erosivos y de calidad de aguas –superficial y subsuperficial- resulta imprescindible entender y cuantificar el movimiento del agua a través del suelo. La estimación de este movimiento suele basarse en la textura y estructura del suelo (*Landini, 2007*), ya que se asume que el agua se mueve a través de sus microporos. Pero, en suelos propensos a la formación de grietas o macroporos podrían generarse vías de flujo rápido, capaces de cambiar de forma drástica el movimiento del agua a través del suelo, conocidas como flujo preferencial. Esto ha sido corroborado por estudios como *Wienhold y Gish (1991)*, *Beven (1991)* o *Cordero et al. (2016)*.

La existencia de los flujos preferenciales es conocida desde hace muchos años y ha sido reportada en investigaciones de 1970 y anteriores, sin embargo es un tema de investigación muy actual, debido a que la sensibilidad analítica ha aumentado desde entonces y es un factor muy importante en diversas áreas (*HeUing y Gish, 1991*).

Esto tendría importantes consecuencias tanto en el movimiento del agua sobre el terreno- y por tanto en la erosión- como en la calidad de aguas subterráneas, haciendo que el suelo pierda la función de filtro natural (*Brady y Weil, 2008*). Precisamente, estudios preliminares (*Casalí et al., 2008*) muestran que, en muchos suelos agrícolas de Navarra, la tasa de infiltración estaría principalmente determinada por este tipo de flujo.

Por otro lado, la formación de estas grietas responde básicamente a procesos de expansión y contracción de las arcillas expansibles de los suelos (*Selby, 1993*), frente a cambios en el contenido de humedad edáfica. Es de esperar, por tanto, que la cantidad y distribución de grietas/macroporos presentes en el suelo vaya cambiando a medida que la humedad del mismo se altere por acción de las lluvias.

Asimismo alteraciones del terreno, como pueden ser los laboreos en campos agrícolas, pueden modificar las vías de infiltración creando una heterogeneidad a nivel espacial. Un ejemplo de la variabilidad espaciotemporal de los flujos preferenciales puede verse en el trabajo de *Giménez et al (2012)*, donde se aprecia una sobreestimación de escorrentía especialmente en periodos secos, mediante simulaciones informáticas.

Todo esto hace que los efectos generados por los flujos preferenciales en los suelos sean muy complejos e impredecibles, generando una gran problemática a la hora de realizar simulaciones y predicciones hidrológicas (*Western et al, 2002*).

El objetivo de este trabajo es cuantificar, en suelos laboreados, la presencia de grietas y macroporos responsables del movimiento rápido del agua; y su variación temporal frente a diferentes contenidos de humedad del suelo.

Esta línea de investigación forma parte de un Proyecto Nacional Coordinado recientemente concedido a la UPNA (Grupo de investigación THERRAE) y a la Universidad de Córdoba: “Análisis y modelado de la generación y tránsito de agua, sedimentos y solutos en terrenos de cultivo para una actividad agraria productiva y sostenible”.

2. METODOLOGÍA

El estudio se ha llevado a cabo en la finca de prácticas de la Universidad Pública de Navarra (UPNA), que se encuentra en Pamplona (Navarra), concretamente en la finca de prácticas de la UPNA que se encuentra detrás del edificio del Sario, como puede observarse en la figura 1.



Figura 1. Ubicación del ensayo en la finca de prácticas de la UPNA.

El emplazamiento de los ensayos está ubicado a los pies de una plantación de manzanos, donde hay una cubierta vegetal formada por césped. Las características del suelo según un análisis llevado a cabo el año 2015 son las que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Análisis de suelo de la zona de estudio (2015).

Elemento analizado	Valor	Unidades
Humedad residual	0,98	%
Arena Gruesa (2-0.2 mm)	1,88	%
Arena Media (0.2-0.1 mm)	1,46	%
Arena Fina (0.1-0.05 mm)	4,28	%
Limos gruesos (0.05-0.02)	14,49	%
Limos finos (0.02-0.002)	46,64	%
Arcillas (<0.002 mm)	31,26	%

pH agua (1:2,5)	7,97	--
pH KCl 1M (1:2,5)	7,33	--
Mat. Org nica oxidable	1,98	%
Fosforo (P2O5)	30,97	mg/Kg
Potasio (K2O)	199,18	mg/Kg
Nitrogeno Total	0,14	%
Relacion C/N	8,27	--
Carbonatos Totales	42,83	%
Caliza activa	14,74	%
C.E. (1:1)	0,47	dS/m

Introduciendo la proporción de limos, arenas y arcillas que se muestran en la tabla anterior en un triángulo textural USDA, se determina que el suelo es de textura franco arcillo limosa.

2.1 DISTRIBUCIÓN DE ZONAS Y ASIGNACIÓN DE PARCELAS

El estudio se ha realizado en la finca de prácticas de la Universidad Pública de Navarra (UPNA) donde se ha habilitado una superficie para llevarlo a cabo. Se han diferenciado 3 zonas en las que se ha arado con distintos aperos; un pase de chisel en el primero, un pase de vertedera en la segunda, y un pase de vertedera seguido de un pase de rastra con rodillo molón en el tercero. De esta forma se han creado 3 franjas continuas de aproximadamente 15m de longitud y 1m de ancho para cada tratamiento (figura 2).

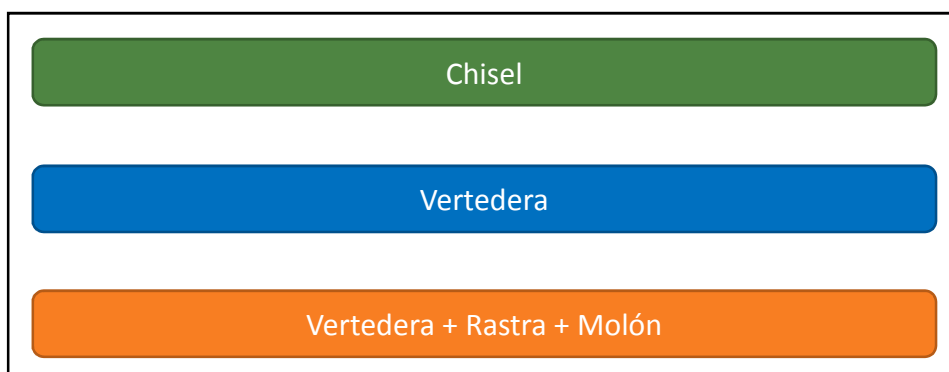


Figura 2. Distribución de los diferentes pases con los aperos.

Se pretende comprobar las diferencias que surgen en las vías de flujo preferencial entre los diferentes laboreos. Además, con el objetivo de observar los cambios que generan los episodios de lluvia en las vías de flujo preferencial con el paso del tiempo, se le da al estudio una dimensión temporal en adición

a la espacial, destinando la mitad de cada tratamiento a ser sometido a simulaciones de lluvia periódicamente mediante un simulador de lluvia (figura 3).

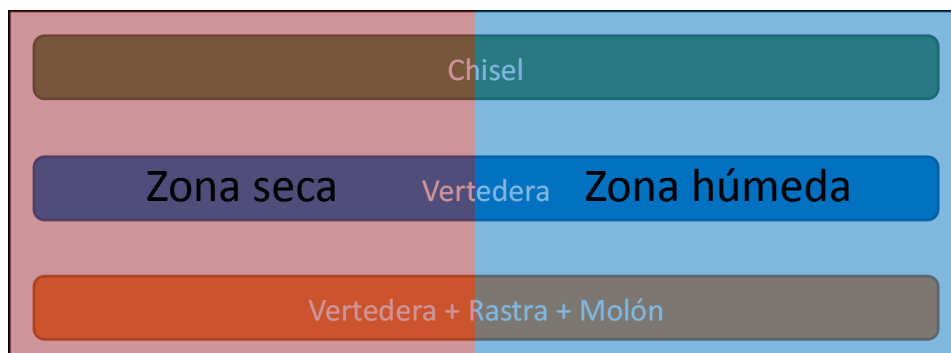


Figura 3. Distribución de la zona húmeda y la zona seca.

De esta forma se crean 6 diferentes zonas de ensayo, siendo estas correspondientes a los 3 pases de aperos con su parte seca y parte húmeda.

Con el objetivo de conocer o tener una aproximación fiable del agua aplicada en la zona húmeda, e impedir al mismo tiempo que la lluvia natural pueda afectar a la zona seca, se han cubierto ambas superficies con un plástico en temporadas de amenazas de precipitación.

Para realizar los ensayos se han delimitado micro-parcelas de 0,5 m x 0,5 m en cada una de las 6 zonas cada vez que se realiza un ensayo. De esta forma se va avanzando desde el centro de las franjas hacia los extremos mientras se van efectuando los mismos, y se llevan a cabo de tal forma que se realiza un ensayo en cada zona antes de seguir con el segundo (figura 4).

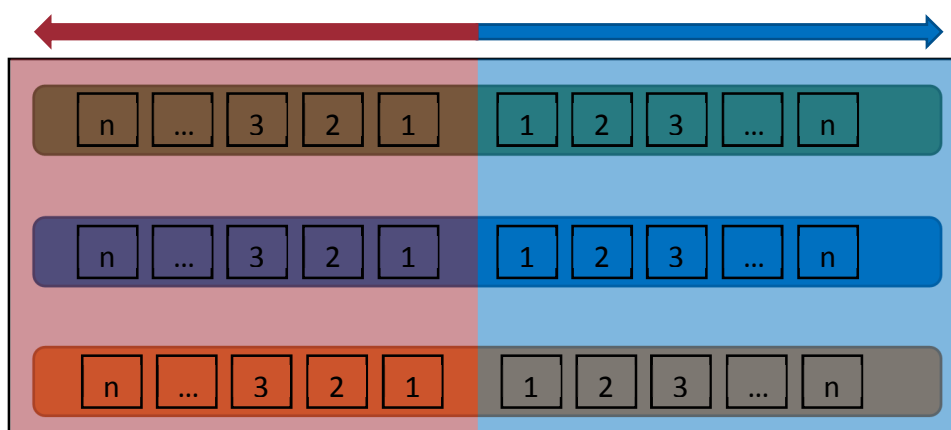


Figura 4. Distribución de parcelas y número de ensayo.

En la imagen anterior (Figura 4) se muestra como se ha ido procediendo a la hora de realizar el trabajo. Los ensayos con la misma numeración se han realizado en un intervalo inferior a 24 horas, es decir desde el inicio del primer ensayo con el número 1 hasta el último con el mismo número no ha pasado más de 24 horas.

Es importante mencionar que se ha realizado un ensayo de referencia (indicado como cero, 0) en el centro de cada una de las franjas, con el objetivo de tener una referencia de como es el suelo inicialmente. Además se ha realizado otro ensayo en suelo sin laborear para poder tener una referencia comparativa frente a los tratamientos con aperos.

2.2 CALIBRACIÓN DEL SIMULADOR DE LLUVIA

Antes de emplear el simulador de lluvia, es necesario realizar una calibración, determinando así la cantidad de agua aplicada y la uniformidad de aplicación. Para ello se ha utilizado una serie de precipitaciones de los últimos 20 años de la estación automática de Pamplona del Gobierno de Navarra. Partiendo de estos datos, se han obtenido las curvas IDF y se ha establecido una intensidad de 32 mm en 0,5h de lluvia correspondiente a un periodo de retorno de 2,5 años.

Para realizar la calibración, se han colocado 15 recipientes a modo de pluviómetros del mismo tamaño repartidos en un área de 3x3 m, con la siguiente distribución (figura 5).



Figura 5. Distribución de los recipientes para la calibración del simulador de lluvia.

De esta forma se puede medir la cantidad de agua acumulada en cada recipiente, observando diferencias entre los centrales y los exteriores. Se han realizado 3 repeticiones en los que se ha medido el volumen de agua de cada uno de los recipientes. Teniendo en cuenta que cada recipiente tiene una superficie de captación de agua de $0,037 \text{ m}^2$, se ha estimado que la cantidad de agua necesaria es en torno a 0,2 litros o 200 ml. Finalmente se determina que el radio efectivo del simulador es de 1m, es decir 2m de diámetro.

2.3 METODOLOGÍA EMPLEADA PARA REALIZAR LOS ENSAYOS

A la hora de realizar estudios acerca del comportamiento del agua y el transporte de solutos, los trazadores son utilizados frecuentemente. Hay numerosos métodos para observar las vías que el agua utiliza para atravesar la matriz del suelo, pero una de las más económicas y fáciles de utilizar, es la utilización de técnicas tinción del suelo mediante el uso de aerosoles en el perfil del suelo (*Allaire et al.*, 2009). Esta técnica se basa en el cambio de color que genera el spray aplicado en el perfil del suelo, sobre el agua aplicada en el terreno con un trazador disuelto, una vez que el color cambia es relativamente sencillo obtener imágenes mediante una cámara de fotos estándar o digital (*Lu y Wu*, 2003).

Probablemente los primeros en utilizar este método para observar el movimiento del agua en el suelo fueron Tamm y Troedsson (1957). Su experimentación utilizaba el ion tiocianato como trazador y una solución de cloruro férrico como reactivo, que se aplicaba en forma de spray sobre el perfil del suelo. Desafortunadamente este método no resultó viable debido a la alta toxicidad del ion tiocianato (*Lu y Wu*, 2003).

Finalmente *Lu y Wu* (2003) dieron con una forma de aplicar este método utilizando bromuro como trazador, y aplicando posteriormente un precipitado de ferrocianuro de plata $\text{Ag}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ en presencia de Fe^{3+} en spray, que con el Br^- forma el azul de Prusia.

Después de esto, en el ensayo realizado por *Nobles, Wilding y Lin* (2010) para determinar las vías de infiltración de agua, se sigue el método planteado por *Lu y Wu* (2003) aplicando bromuro en forma de solución acuosa con CaBr_2 (30g/l) y utilizando una suspensión de ferrocianuro de plata $\text{Ag}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ con nitrato de hierro (III) $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ en spray, en partes iguales. El ferrocianuro de plata y el nitrato de hierro se preparan de forma separada y en recipientes opacos y se mezclan en el momento de la aplicación para evitar que se forme un exceso de azul de Prusia en la suspensión.

Viendo que los resultados obtenidos por *Nobles, Wilding y Lin* (2010) son satisfactorios en cuanto al método utilizado para trazar las vías de infiltración, se ha seguido el mismo procedimiento. La única diferencia reside en que el lugar de utilizar CaBr_2 como fuente de bromuro, se ha utilizado bromuro de potasio KBr (30 g/l).

Una vez en campo, con las soluciones preparadas, se aplican 2 litros de solución de bromuro en las parcelas de 0,5 x 0,5 m con ayuda de un marco, de forma homogénea mediante una regadera. Posteriormente se realiza un primer corte vertical en el perfil del suelo, de aproximadamente 0,5 m de profundidad y se aplica la mezcla de ferrocianuro de plata con nitrato de hierro (III) en forma de spray sobre el perfil. Después de esto, el perfil del terreno empieza a tomar un color azul en las zonas por donde hay presencia de la solución de bromuro anteriormente aplicada, cuando esto ocurre se coloca un marco graduado preparado para facilitar el procesamiento de la imagen digital del terreno y se toma la imagen con una cámara, identificando mediante una tarjeta el tratamiento, número de ensayo, y el número de corte.

Finalmente se obtiene una muestra de suelo de cada uno de los ensayos con el objetivo de conocer el estado de humedad de cada zona en el momento del ensayo. Los datos de humedad de suelo se resumen en el apartado “3 Resultados” y los completos están recogidos en el “Anexo 4: Datos de

humedad de los ensayos". Estas humedades corresponden a una humedad combinada entre una mitad obtenida a los 10 cm de profundidad y la segunda mitad a 40 cm.

Las fechas en las que se han realizado los ensayos son las siguientes (tabla 2):

Tabla 2. Cronología de los ensayos

Número de ensayo	Fecha de realización
0	28/10/2016
1	22/11/2016
2	21/12/2016
3	04/01/2017
4	31/01/2017

Importante mencionar que no todos los ensayos del mismo número son realizados el mismo día pero sí en un intervalo inferior a 24h. Además como se ha comentado anteriormente, 5 días antes (aproximadamente) de la realización del ensayo se ha realizado la aplicación de precipitación mediante el simulador de lluvia, en la zona correspondiente, excepto entre el ensayo 3 y el 4 con el objetivo de ver diferencias en el tiempo después de aplicar la lluvia.

A destacar también el hecho de que a pesar de que la zona seca ha estado tapada bajo plástico impermeable, se constató que ha habido presencia de agua en algunos ensayos. La aparición de humedad en la zona seca viene provocada por la pendiente de la parcela, haciendo que el agua escurra hasta las zonas de muestreo. Las zonas afectadas corresponden a la base del perfil del suelo de los agujeros realizados para llevar a cabo los ensayos. A pesar de ello, esta humedad no ha sido aplicada de forma directa sobre el terreno como precipitación en ninguno de los casos y solo afectaría a la zona inferior del perfil del suelo.

2.4 PROCESADO DE IMÁGENES

Una vez que se han obtenido las imágenes el siguiente paso ha consistido en procesarlas mediante herramientas informáticas. El objetivo de este procesado de imagen, es llegar a obtener una imagen binaria en la que se muestre en negro (valor 0) la matriz del suelo y en blanco (valor 1) las vías de flujo preferencial. El procesado de imágenes se ha llevado a cabo mediante el programa QGIS, siguiendo el siguiente orden de operaciones:

1. Georreferenciación de las imágenes
2. Obtención de un Clipper para cada imagen
3. Generar la imagen binaria de cada Clipper
4. Obtención de estadísticas

2.4.1 Georreferenciación de las imágenes

Las imágenes obtenidas en campo no están tomadas desde un ángulo completamente perpendicular al perfil del terreno y por ello presentan ciertas deformaciones (Figura 6).



Figura 6. Ejemplo de una imagen tomada en campo.

Tal y como se ve en la figura anterior (Figura 6), a causa del ángulo en el que se ha tomado la imagen, la parte superior del marco tiene mayor longitud que la inferior, cuando realmente la parte superior y la inferior deben ser iguales.

Para corregir este error, se ha utilizado la herramienta de georreferenciado de QGIS. Esta herramienta permite dar coordenadas a diferentes puntos de la imagen, pudiendo redefinir el lugar que ocupan ciertos elementos en la misma. Teniendo en cuenta que se conoce la distancia que hay entre cada una de las dianas ubicadas en el marco, se les ha asignado coordenadas X, Y relativas a cada una de ellas tal y como se muestra en la figura 7

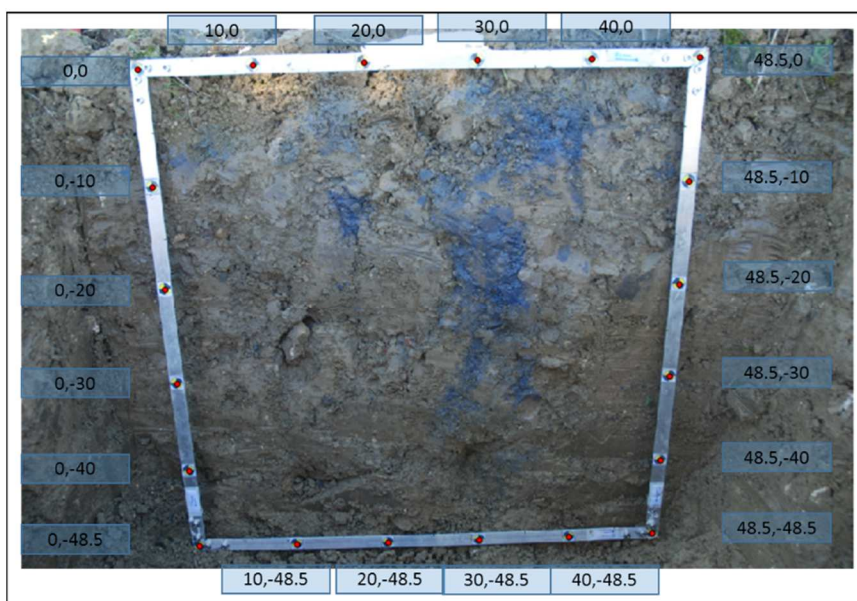


Figura 7. Ejemplo de georreferenciación de una imagen.

Una vez introducidas todas las coordenadas relativas, se le asigna un proceso proyectivo de georreferenciación, se guarda y se incorpora a QGIS generando la imagen corregida (figura 8).



Figura 8. Ejemplo de una imagen georreferenciada.

Comparando las figuras anteriores se puede comprobar como el proceso de georreferenciación consigue corregir el error de proyección que se genera en la toma de la imagen.

2.4.2 Obtención del Clipper:

Un clipper es la extracción de una parte de la imagen que permite centrar el trabajo en una zona específica de la misma. En este caso, una vez que se obtiene la imagen corregida, se extrae únicamente la parte que está dentro del marco. Para ello se hace un clipper con la herramienta de QGIS (figura 9).



Figura 9. Ejemplo de un clipper de una imagen.

De esta forma, la imagen binaria que se pretende obtener, solo tendrá en cuenta la zona interior del marco, que es la superficie que se está analizando, quedando excluidos el marco y la zona exterior del mismo.

2.4.3 Obtención de la imagen binaria:

El siguiente proceso trata de contrastar el área que abarca la zona tintada frente a la matriz del suelo. Para realizar este proceso, se ha utilizado la herramienta Calculadora raster de QGIS. Los clipper obtenidos (al igual que las imágenes de partida), están formados por 3 bandas, RGB (Rojo, Verde y Azul), esto quiere decir que cada píxel de la imagen tiene un valor de cada una de estas bandas, y la combinación de estas bandas es la que determina el color que muestra cada uno de estos píxeles. En este caso, el color que se está buscando es azul, por lo que es lógico que la banda correspondiente al azul, es decir la tercera, tenga un valor superior respecto a las otras dos en los píxeles que corresponden a la zona teñida. Se ha constatado que en la mayoría de las imágenes, en los píxeles que corresponden a vías de flujo preferencial, la banda azul tiene un valor superior en 30 unidades respecto a la banda roja (la primera), pero dependiendo de la iluminación en la toma de la foto este valor varía entre 0 y 30, por lo que hay que ir realizando pruebas de comprobación a posteriori para cada imagen.

La expresión que se introduce en la calculadora raster es la siguiente:

$$\text{Banda3} - \text{Banda1} \geq X$$

Siendo X un valor entre 0 y 30 en función de la imagen.

Realizando esta operación se genera la imagen binaria, que muestra en color blanco (valor 1) los píxeles correspondientes a la zona teñida, y en negro (valor 0) los correspondientes a la matriz del suelo (figura 10).

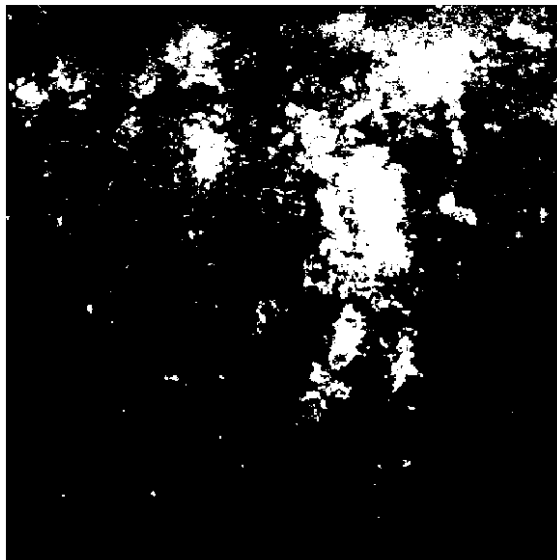


Figura 10. Ejemplo de imagen binaria.

En la figura anterior (Figura 10) se puede observar como es la imagen binaria generada a partir del clipper mediante la calculadora raster de QGIS. A modo de comprobación, se genera una capa vectorial partiendo de esta imagen que se superpone sobre el clipper, permitiendo observar la fiabilidad de la imagen binaria generada. Para ello se utiliza la herramienta de poligonización de QGIS, dejando solo el contorno de los elementos generados (figura 11).



Figura 11. Ejemplo de comprobación de la imagen binaria sobre el clipper.

Tal y como se muestra en la imagen anterior, el contorno de la imagen binaria generada casa con la zona teñida del clipper. Esto demuestra que la imagen binaria es correcta.

2.4.4 Obtención de estadísticas

Una vez que se ha comprobado que la imagen binaria obtenida es correcta, es necesario extraer información de la misma. Teniendo en cuenta que lo único que contiene esta imagen es el valor 0 o 1 de sus píxeles, se ha analizado la superficie que ocupa el área teñida frente a la matriz del suelo. Para poder realizar esta comparación a un nivel más exhaustivo, se ha generado una malla que divide la imagen en cuadrados de 1cm^2 , de tal forma que permite analizar esta información dividida en cada uno de los cuadros delimitados por la malla. Esto conlleva la posibilidad de analizar la infiltración en función de la profundidad, además de en la totalidad de la superficie.

Para ello, QGIS tiene una herramienta de análisis que crea una malla de dimensiones personalizadas, generando una capa vectorial. Una vez que se ha generado la malla, mediante la herramienta “Estadísticas de zona” se le asignan las estadísticas deseadas de la imagen binaria, a cada una de las celdas. Estas estadísticas son las siguientes; número, suma, media, mediana, desviación estándar, mínimo, máximo, intervalo, minoría, mayoría y variedad. Por lo tanto a cada una de las celdas se les añaden los datos de los campos de las estadísticas mencionadas. Estas estadísticas quedan guardadas en la tabla de atributos de cada imagen, generándose así una tabla de datos por cada imagen procesada (figura 12).

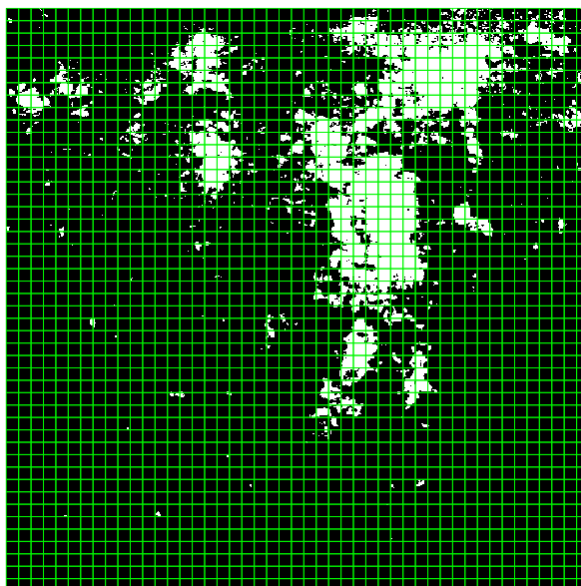


Figura 12. Ejemplo de la malla para analizar las estadísticas.

Cada una de las imágenes que se ha tratado tiene una nomenclatura concreta con la que se ha identificado para procesos futuros. Esta nomenclatura consta de dos letras y dos números separados con un guion bajo. La primera letra determina el tipo de tratamiento, siendo “C” para el chisel, “V” para la vertedera, “R” para la vertedera con rastra y rodillo molón y “SD” para el suelo sin laborear. La siguiente letra determina si la imagen corresponde a la zona húmeda “P”, o a la zona seca “S” del tratamiento. El primer número indica el número de ensayo al que corresponde la imagen pudiendo ir desde 0 hasta 4, mientras que el segundo número indica el número de corte al que representa esa imagen, pudiendo ir nuevamente de 0 a 4. A modo de ejemplo, una imagen que corresponde al

segundo corte del primer ensayo de la zona húmeda del chisel tendría la siguiente nomenclatura: CP1_2. Esto se muestra en la siguiente tabla (tabla 3).

Tabla 3. Nomenclatura de los tratamientos.

Nomenclatura	Tratamiento
SD	Suelo sin laboreo
CS	Chisel zona seca
VS	Vertedera zona seca
RS	Vertedera+Rastra con molón zona seca
CP	Chisel zona húmeda
VP	Vertedera zona húmeda
RP	Vertedera+Rastra con molón zona húmeda

Cada uno de los tratamientos anteriores lleva un número indicando el número de ensayo, y seguido de un guion bajo el número de corte (Ej. CS1_1).

En el ensayo 0 de cada tratamiento se realizaron 3 cortes en lugar de 4, pero se obtuvieron 2 imágenes por corte, para probar la variabilidad entre ellos. Por lo tanto el número de corte de estas imágenes puede alcanzar el número 6 en la nomenclatura.

Para poder analizar la información en función de la profundidad, es necesario conocer el número de celdas que compone una fila entera de la malla, que en este caso son 47. Esto quiere decir, que analizando las celdas de las tablas de 47 en 47, se está realizando un análisis de centímetro a centímetro en profundidad.

Cada imagen tiene asociada una única tabla, si se tiene en cuenta que se existen 6 zonas diferentes, y cada ensayo consta de 4 cortes con sus respectivas fotografías (salvo el ensayo 0 que tiene 6), da un total de 24 fotografías por ensayo. Se han realizado 4 ensayos completos, el ensayo 0 solo realizado en la zona seca de cada zona, y el ensayo en suelo sin laborear seco. Esto hace un total de 116 imágenes con sus respectivas tablas. Si a esto se le añade la necesidad de analizar las estadísticas de las tablas cada 47 celdas para ver la infiltración en función de la profundidad, teniendo cada una de ellas 2208 celdas, realizar el trabajo manualmente resultaría un trabajo muy laborioso.

Debido a la necesidad de manipular un gran volumen de datos, se ha visto la necesidad de desarrollar una aplicación que automatice el proceso de obtención de estadísticas de las tablas de atributos de las mallas utilizadas en las imágenes. El objetivo de esta aplicación es obtener en una hoja de cálculo las estadísticas de todas o una de las tablas generadas a partir de las imágenes.

La aplicación ha sido programada con visual basic (VBA) en Microsoft Excel, que importa cada una de estas tablas, obteniendo las estadísticas de cada una de las filas. El funcionamiento de la aplicación así

como el código empleado para generarla se encuentra detallado en el “Anexo 3: Aplicación de importación de tablas”.

A partir de estos datos se han ido generando gráficos para poder representar los resultados de una forma más visual y comparativa, realizando un análisis estadístico entre tratamientos mediante análisis de varianzas. Éstos se muestran en el apartado 3 Resultados.

3. RESULTADOS

En este apartado se muestran los resultados de los ensayos realizados mediante la metodología anteriormente descrita. Hay que tener en cuenta que las imágenes obtenidas corresponden a cortes transversales del perfil del suelo. Esto permite hacerse una pequeña idea de cómo es ese suelo analizando las vías de flujo preferencial superponiendo las imágenes como se muestra en la figura 13.

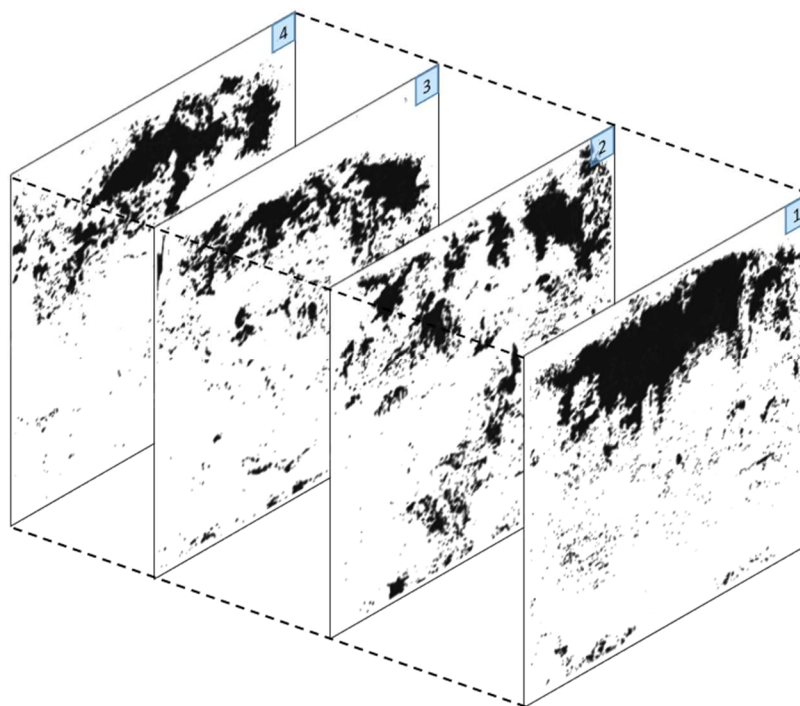


Figura 13. Ejemplo de los cortes en el perfil de suelo (en negro flujo preferencial, en blanco la matriz del suelo).

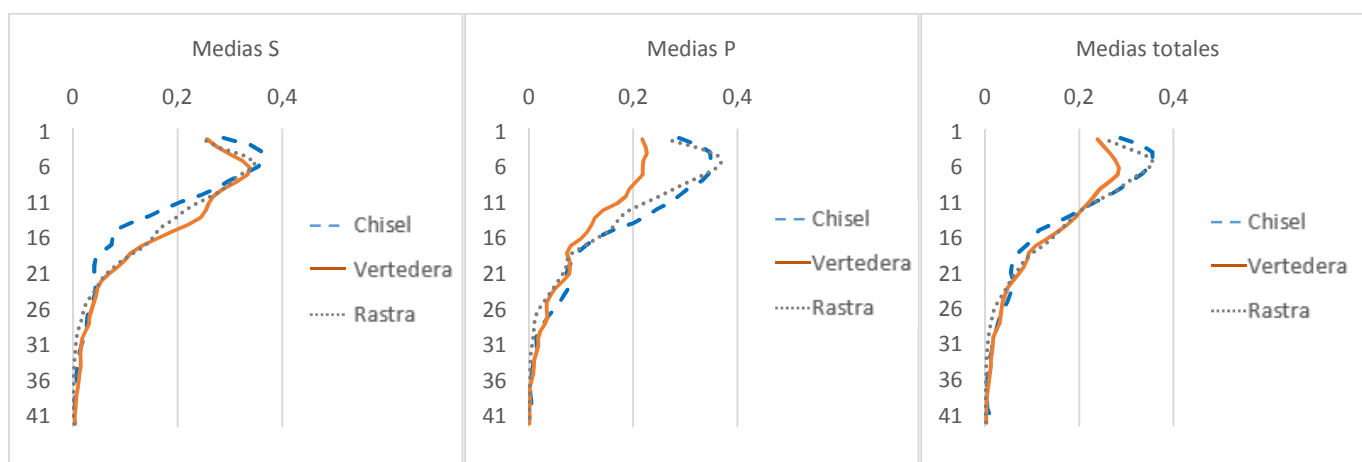
Observando las imágenes binarias obtenidas se percibe que en gran parte de ellas hay una ausencia de flujo preferencial en los primeros 5 cm del perfil. Esto no es lógico, debido a que si hay evidencias de que ha habido presencia de agua en profundidad, debe de haberlas también en superficie. Por lo tanto este error se le achaca a que el bromuro no se ha adherido bien en superficie, los propios autores de la técnica utilizada (Lu y Wu, 2003) mencionan que el bromuro podría no absorberse en suelos con alta concentración de Cl^- , o en suelos que tengan un contenido de humedad superior al 15% (en suelos arcillosos), es así que a la hora de realizar los cálculos se han desestimado estos datos.

Debido a la gran cantidad de imágenes que se han obtenido, las imágenes binarias completas se muestran en el “Anexo 1 Resultados: Imágenes binarias”. Para facilitar la comparación de forma visual, se exponen los datos mediante gráficas en las que en el eje X se muestra la media de la proporción de superficie teñida y en el eje Y la profundidad en cm que se recogen en el “Anexo 2 Resultados gráficos de los tratamientos”.

Existe una notoria tendencia a la aparición de vías de flujo preferencial (FP) hacia uno de los lados de la imagen, concretamente el derecho, como se puede observar en la figura correspondiente al ensayo SD0_1 del Anexo 1 (figura 18). Si se dibujara una diagonal desde el extremo superior izquierdo de las imágenes hasta el extremo inferior derecho de las mismas, la mitad superior derecha albergaría la

mayor parte de las vías de flujo preferencial. Esto puede estar ligado a la pendiente de la parcela que está a favor de las formas que se observan en las imágenes, haciendo que el agua vaya entrando por las vías de flujo preferencial a medida que avanza por la pendiente sin tener tiempo de infiltrar por la matriz del suelo. Esto corrobora la sensibilidad y adecuación de esta técnica de tinción para la detección de vías de movimiento rápido del agua en el suelo.

Analizando visualmente las gráficas (figura 14-16), se puede ver como hay una tendencia clara que comienza con una gran cantidad de vías de flujo preferencial, que decrece drásticamente a partir de aproximadamente 20 cm de profundidad.



Figuras 14, Figura 15. Y Figura 16. Medias de superficie de flujo preferencial respecto a la matriz de suelo por profundidad, para la zona seca (S), zona húmeda (P), y la combinación de ambas (medias totales) respectivamente. Para mayor detalle ver anexo 2.

Esto puede ser debido a la presencia de una suela de labor, que se ha podido comprobar in situ a la hora de realizar los ensayos, donde se mostraba una capa dura entre los 20 y 25 cm. Esta suela de labor (aunque menos marcada) también se ha podido comprobar en el ensayo en suelo sin arar (tratamiento testigo), proveniente del pasado agrícola de la zona de estudio, sin embargo se ha visto menos influenciado por la suela de labor. Otros estudios realizados también han detectado como la suela de labor interrumpe los flujos preferenciales en suelos agrícolas como puede ser el caso de *Helmhart* (2012). Precisamente, en suelos no agrícolas (y por tanto sin capas compactadas inducidas por el laboreo) las vías de FP podrían superar como mínimo el metro de profundidad (*Hardie et al*, 2011) y eventualmente alcanzar capas freáticas.

Además esta suela de labor explicaría la generación de un importante flujo subsuperficial observado anteriormente por nuestro grupo de investigación en estos mismos suelos. En aquella oportunidad, al aplicar una elevada descarga de agua durante más de una hora pendiente arriba de una ladera, la escorrentía fue mínima en todo momento al infiltrarse el agua rápidamente a través de los macroporos y grietas del estrato superior, mientras que pendiente abajo el agua afloraba en superficie. Esto se explicaría al verse interrumpida la continuidad de estas vías de agua en la capa de suelo compactada por el laboreo, originándose así un movimiento de agua subsuperficial. El estudio realizado por *Garey et al.* (2014), muestra como en la rivera de los ríos este tipo de flujo subsuperficial puede transportar la misma cantidad de solutos que la propia escorrentía superficial, y eventualmente contaminar cursos de agua.

Observando las imágenes binarias obtenidas (anexo 1), se puede determinar que existe una gran variabilidad de presencia de flujo preferencial incluso dentro del mismo ensayo. Asimismo, esta presencia de flujo preferencial es más manifiesta en las zonas más próximas a la superficie (0-20 cm) en la mayoría de los casos. Esto concuerda con los resultados obtenidos por *Zhang* (2015), en ensayos realizados en ecosistemas de bosque, donde también se destaca una gran heterogeneidad de los flujos preferenciales.

Otra observación interesante en cuanto a las vías de FP, se observa en el primer ensayo del tratamiento con chisel (CS0_1, figura 22 del Anexo 1), donde se muestran unas vías de FP verticales notablemente marcadas, causados por el propio apero. A partir de este momento, se comporta como el resto de tratamientos, es decir, teniendo una presencia de vías de flujo preferencial más difusa y muy variable (ver ejemplo CS3_1, figura 36 del anexo 1).

La gran irregularidad y variedad de patrones de distribución observados en los diferentes tratamientos estaría indicando que, visto en 3 dimensiones, el flujo preferencial se estaría produciendo a través de una compleja red de grietas interconectadas entre sí; conformado un sistema de macroporos intrincado y de elevada tortuosidad.

A priori, parecería que los resultados de las medias que se muestran en las figuras 14, 15 y 16 indican una gran similitud entre tratamientos, pero realizando un análisis más exhaustivo realmente no lo son.

Tanto es así que comparando los ensayos mediante un análisis de varianzas discriminado por profundidad (ANOVA con 2 factores), se ve que los tratamientos son diferentes entre sí con un nivel de significancia del 95%, siendo el chisel el que mayor superficie tiene de flujo preferencial (11,45%), seguido de la rastra (10,98%) y finalmente la vertedera (10,51%).

No obstante, teniendo en cuenta la influencia que tiene la suela de labor en este tipo de suelos se puede apreciar una mayor variabilidad sobre todo en los primeros 20 cm como se puede ver en las figuras del anexo 2., y en el ejemplo de la figura 17.

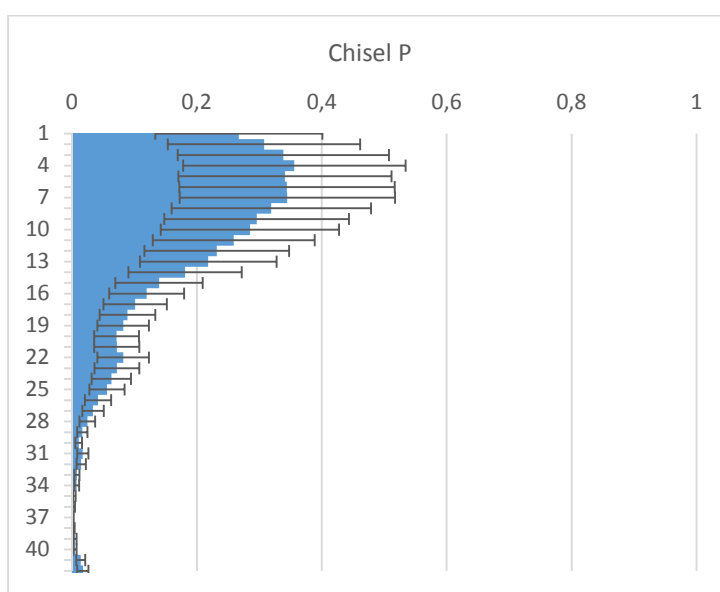


Figura 17. Ejemplo de resultado individual del chisel en zona húmeda (también disponible en el Anexo 2).

Si se realiza este análisis estadístico considerando solo la zona superior del perfil (0-20 cm), también se obtiene que los resultados son diferentes entre sí pero en este caso la diferencia de superficie de flujo preferencial respecto a la matriz del suelo es de 21, 73% para la rastra, 21,53% en el caso del chisel y 19,76% para la vertedera, evidenciando la diferencia existente entre el estrato superior (0-20 cm) y el inferior (20-50) mostrando que en el superior la rastra es la que mayor superficie muestra, mientras que en el total es el chisel, además se acentúa la diferencia que tienen estos tratamientos respecto al de la vertedera.

Por otro lado, realizando un análisis estadístico del perfil de suelo completo (0-50 cm) entre los resultados obtenidos entre la zona húmeda y la zona seca se observa que no hay diferencias significativas en vías de FP, es decir son estadísticamente iguales con un nivel de significancia del 95%, excepto para el caso de la rastra en el que hay pequeñas diferencias. En total un 10,66% de la superficie correspondiente a flujo preferencial en la zona húmeda y 11,24% en la zona seca

Sin embargo, realizando el análisis estadístico solo en la mitad superior del perfil (0-20 cm), se demuestra que los resultados obtenidos en los primeros 20 cm de la zona húmeda y la seca son diferentes con un nivel de significancia del 95%, siendo 20,24% de la superficie correspondiente a flujo preferencial en la zona húmeda y 21,62% en la zona seca. Los procesos de expansión del suelo por absorción de agua son más acentuadas cuando las condiciones de humedad del suelo están más próximas a la saturación (*Castro et al*, 1999), por lo tanto la zona superior de los ensayos de la zona húmeda han sido alterados por este proceso, mientras que los de la zona seca no y además la suela de labor ha impedido que el frente de humedecimiento alcance los estratos inferiores. Sin embargo, viendo detenidamente los datos de humedad del suelo en cada uno de los ensayos (Tabla 4), se puede comprobar que hay muy poca diferencia entre los ensayos de la zona de precipitaciones y de la zona seca. Esto es debido a que los datos de humedad son el resultado de muestras compuestas tomadas por arriba (10 cm) y por debajo (40 cm) de la suela de labor y por lo tanto el valor de humedad del suelo no sería representativo del estrato superior (0-20 cm).

Tabla 4. Humedad del suelo en cada ensayo. Estos datos de humedad se han obtenido combinando muestras superficiales (10 cm) y profundas (40 cm).

	C0	V0	R0	C1	V1	R1	C2	V2	R2	C3	V3	R3	C4	V4	R4
Zona seca	13%	17%	13%	17%	16%	15%	19%	23%	18%	20%	21%	18%	21%	19%	20%
Zona húmeda	-	-	-	21%	19%	18%	19%	22%	21%	22%	21%	21%	20%	21%	22%

Esta variación que genera la diferencia de humedad en el suelo también fue comentada por *Hardie et al* (2013), observando que utilizando sistemas de monitorización de humedad de suelo de alta frecuencia, se vio que el flujo preferencial no depende de la cantidad de agua de lluvia ni de su intensidad, sino del contenido de humedad previo del propio suelo. Observación también realizada en *Hardie et al* (2011), indicando que en suelos secos la infiltración por flujo preferencial es más profunda

que en húmedos, 1,05 m frente a 0,35 m, en nuestro estudio no se ha podido evidenciar este dato a causa de la suela de labor.

Esto concuerda con el estudio realizado por *Casali et al* (2008) en cuencas agrícolas del centro de Navarra, donde se muestra que la mayor cantidad de escorrentía es generada en invierno, estando el suelo saturado, en lugar de en verano donde el suelo está seco y a pesar de que las lluvias más tormentosas se den en esta última época, son abstraídas (en mayor grado) por los flujos preferenciales.

Es importante remarcar, que las diferencias aquí presentadas se refieren a la proporción de suelo ocupada por los flujos preferenciales, pero no aportan información directa en cuanto a tasa de infiltración. Sin embargo el estudio de *Mezkiritz* (2012), realizado en una localización próxima y condiciones similares aunque no contemporáneas, muestra como las tasas de infiltración pueden variar mucho de un tipo de laboreo a otro como se muestran en la tabla 5. Esta infiltración fue medida con el método de doble anillo.

Tabla 5. Tasa de infiltración básica de diferentes tratamientos del estudio *Mezkiritz* (2012).

Tratamiento	Tasa de infiltración (mm/h)	%ΔI*
Vertedera seguida de rodillo molón	50,35	318
Rotavator	38,61	221
Chisel seguido de gradilla	15,25	27

*Incremento porcentual respecto al suelo de referencia sin tratamiento (12,03 mm/h)

Esto es una clara evidencia de que los resultados obtenidos son fruto de flujos preferenciales, que permiten una infiltración de agua mucho más elevada a la esperada para esta clase textural que es de en torno a 5 mm/h (*Porta et al*, 2005; *Saxon*, 2009). Además en los ensayos pudo observarse como en menos de 10 minutos desde la aplicación del trazador, ya había evidencias de flujo preferencial en el suelo.

4. CONCLUSIONES

- La relativa sencillez de la técnica de tinción evaluada facilitaría su implementación a gran escala. Por ejemplo, permitiría la caracterización de grupos de suelos a nivel de cuenca, delimitando áreas donde la infiltración estuviese controlada por vías de flujo preferencial.
- Capas compactadas por el laboreo son capaces de interrumpir drásticamente las vías de flujo preferencial en profundidad.
- La suela de labor podría resultar beneficiosa en donde se verifica un elevado flujo preferencial, siempre y cuando no ofrezca una elevada resistencia mecánica a las raíces, limitando el volumen de exploración de las mismas. Además esta suela de labor podría evitar el transporte de solutos a través de flujo preferencial evitando la contaminación potencial de aguas subsuperficiales. Sin embargo, podrían generar flujos subsuperficiales horizontales, pudiendo llegar a cauces de ríos.
- Existe una compleja red de macroporos y grietas interconectadas de tal manera que facilitan el rápido movimiento del agua, generando tasas de infiltración muy superiores a las esperadas en los suelos en estudio. Los diferentes laboreos del suelo afectan de manera distinta a dicha red de macroporos y grietas
- En suelos con presencia de vías de flujo preferencial, la estimación de la tasa de infiltración sólo a través de la textura dominante, estaría subestimando drásticamente este importante parámetro hidrológico. Este fenómeno sería aún más evidente durante los meses de verano cuando las grietas serían todavía mayores debido a la menor humedad antecedente de los suelos.
- Una completa caracterización de este fenómeno (flujo preferencial) debería ir acompañada de mediciones in situ de la tasa de infiltración. Se sugiere el uso de infiltrómetros de disco de succión los cuales permiten discriminar entre la infiltración a través de la matriz del suelo de aquella que ocurre sólo por macroporos.
- La gran variabilidad espacial de las vías de flujo preferencial harían necesario incrementar el número de perfiles analizados, en cada situación, de tal manera de poder concebir una imagen 3D del suelo mejor acabada.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Allaire, S. E., Roulier, S., & Cessna, A. J. (2009). Quantifying preferential flow in soils: A review of different techniques. *"Journal of Hydrology,"*378(1).
- Beven, K. (1991). Modeling preferential flow: An uncertain future. *"Preferential Flow, American Society of Agricultural Engineers, St Joseph, MI,"* 11
- Brady, N. C., & Weil, R. (2013). *"Nature and properties of soils, the: Pearson new international edition"* Pearson Higher Ed.
- Casalí, J., Giménez, R., Díez, J., Álvarez-Mozos, J., de Lersundi, J Del Valle, Goñi, M.López, J. (2010). Sediment production and water quality of watersheds with contrasting land use in navarre (spain). *Agricultural Water Management,* 97 (10).
- Cordero, J., Cuadrado, A., Prat, P., & Ledesma, A. (2016). Description of a field test involving cracking in a drying soil. *E3S Web of Conferences.*
- Fox, G. A., Gao, B. Halihan, T. Heeren, D. Muñoz-Carpena, R. Penn, C. (2014) Influence Of Preferential Flow on Coupled Collid, Nitrogen, And Phosphorus Transport Through Riparian Buffers.
- González, C. A. (1989). Simulación hidrológica. *"Ingeniería e Investigación"*.
- Hardie, M. A., Cotching, W. E., Doyle, R. B., Holz, G., Lisson, S., & Mattern, K. (2011). Effect of antecedent soil moisture on preferential flow in a texture-contrast soil. *"Journal of Hydrology,"*398(3), 191-201.
- Hardie, M., Lisson, S., Doyle, R., & Cotching, W. (2013). Determining the frequency, depth and velocity of preferential flow by high frequency soil moisture monitoring. *"Journal of Contaminant Hydrology,"*144(1), 66-77.

- Helmhart, M. Efecto del fenómeno de flujo preferencial en la distribución espacial y especiación química de elementos tóxicos en el suelo. the influence of preferential flow pheno-mena on the spatial distribution and chemi.
- HeUing, C., & Gish, T. (1991). Physical and chemical processes affecting referential flow. "American Society of Agricultural Engineering" 77 50-63.
- Landini, A. M., Martínez, D., Días, H., Soza, E., Agnes, D., & Sainato, C. (2007). Modelos de infiltración y funciones de pedotransferencia aplicados a suelos de distinta textura. "Ciencia Del Suelo" 25(2), 123-131.
- Lu, J., & Wu, L. (2003). Visualizing bromide and iodide water tracer in soil profiles by spray methods. "Journal of Environmental Quality" 32(1), 363-367.
- Mezkiritz Barberena, I. (2012). Determinación de la capacidad de almacenamiento superficial de agua en un suelo sometido a diferentes labores agrícolas.
- Nobles, M., Wilding, L., & Lin, H. (2010). Flow pathways of bromide and brilliant blue FCF tracers in caliche soils. "Journal of Hydrology," 393(1), 114-122.
- Pérez, E. G., & Romance, A. M. (2012). Modelación de la infiltración en un campo agrícola de la cuenca del río chirgua, estado carabobo, venezuela. "Revista Científica UDO Agrícola" 12(2), 365-388.
- Porta Casanellas, J., López-Acevedo Reguerín, M., & Jaume Porta Casanellas, Marta López-Acevedo. (2005). "Agenda De Campo De Suelos: Información De Suelos Para La Agricultura y El Medio Ambiente".
- SÁNCHEZ, J. C. R., HIDROLOGÍA, TITULAR DE HIDRÁULICA E, & DE MONTES, E. I. Cálculo de caudales de avenida.
- Saxon, K.E., Rawls, W. Soil water characteristics, hydraulic properties calculator. Disponible en: <https://hrs1.ba.ars.usda.gov/soilwater/Index.htm>
- Selby, M. (1993). Hillslope materials and processes "oxford univ. Press, New York"

- Steenhuis, T., & Parlange, J. (1990). Preferential flow in structured and sandy soils. *"Engineering: Cornell Quarterly ECQUAU,"* 25(1)
- Taboada Castro, M. M., Lado Liñares, M., Diéguez Villar, A., & Paz González, A. (1999). Evolución temporal de la infiltración superficial a escala de parcela.
- Western, A. W., Grayson, R. B., & Blöschl, G. (2002). Scaling of soil moisture: A hydrologic perspective. *"Annual Review of Earth and Planetary Sciences,"* 30(1), 149-180.
- Wienhold, B., & Gish, T. (1991). Chemical factors contributing to the formation of preferential flow pathways. *"Preferential Flow. Proceedings of the National Symposium, December,"* 16-17.
- Zhang, Y., Niu, J., Yu, X., Zhu, W., & Du, X. (2015). Effects of fine root length density and root biomass on soil preferential flow in forest ecosystems. *"Forest Systems,"* 24(1).

Universidad Pública de Navarra
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS AGRONOMOS

Nafarroako Unibertsitate Publikoa
NEKAZARITZAKO INGENIARIEN
GOI MAILAKO ESKOLA TEKNIKO



Anexo 1

Resultados: Imágenes binarias

Presentado por:

IBAN ITURRIA AGUINAGA

MASTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA AGRONÓMICA

ANEXO 1: RESULTADOS: IMÁGENES BINARIAS

En este anexo se muestran todas las imágenes binarias obtenidas a partir del procesado de las imágenes obtenidas en los ensayos. Se clasifican primero por zona seca y húmeda, posteriormente por tratamiento (chisel, vertedera o rastra), número de ensayo y número de corte. Cada una de las imágenes tiene unas dimensiones de 47x47 cm tal y como se ve en la figura 28 y se aplica a todos los tratamientos. Por otra parte la nomenclatura utilizada para las imágenes se resume en la tabla 6.

Tabla 6. Nomenclatura de cada tratamiento.

Nomenclatura	Tratamiento
SD	Suelo sin laboreo
CS	Chisel zona seca
VS	Vertedera zona seca
RS	Vertedera+Rastra con molón zona seca
CP	Chisel zona húmeda
VP	Vertedera zona húmeda
RP	Vertedera+Rastra con molón zona húmeda

*Cada uno de los tratamientos anteriores lleva un número indicando el número de ensayo, y seguido de un guion bajo el número de corte (Ej. CS1_1).

Zona seca

Suelo sin laborear

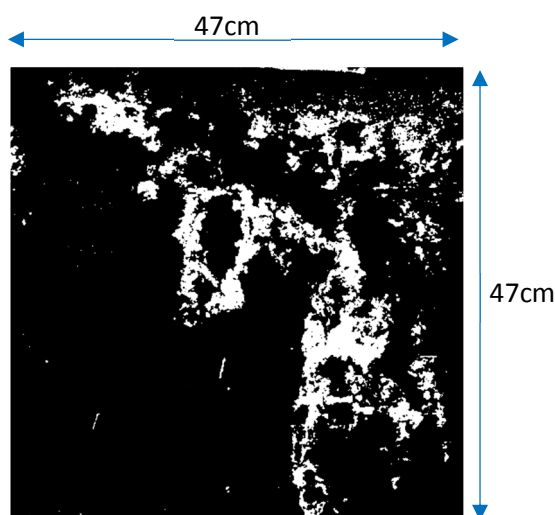


Figura 18. SD0_1

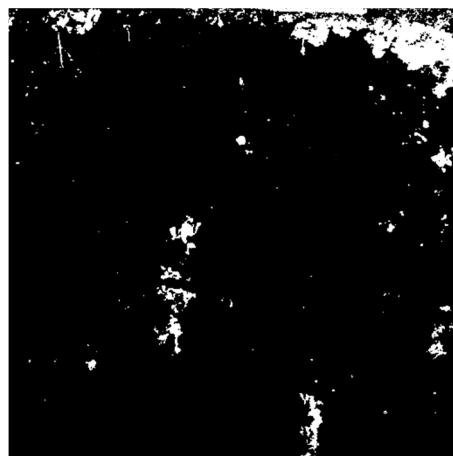


Figura 19. SD0_2

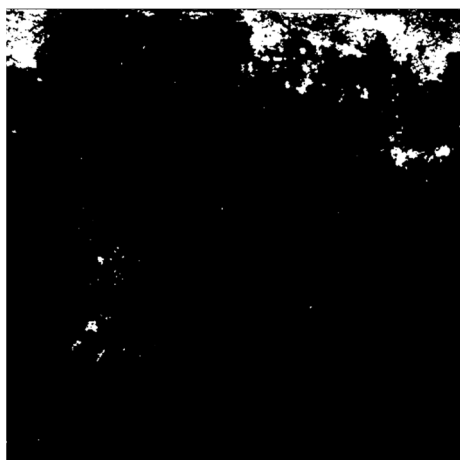


Figura 20. SD0_3

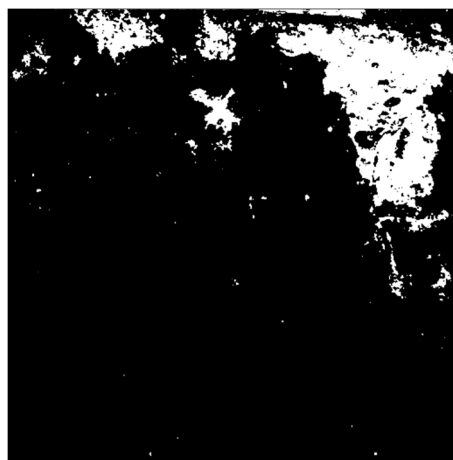


Figura 21. SD0_4

Chisel

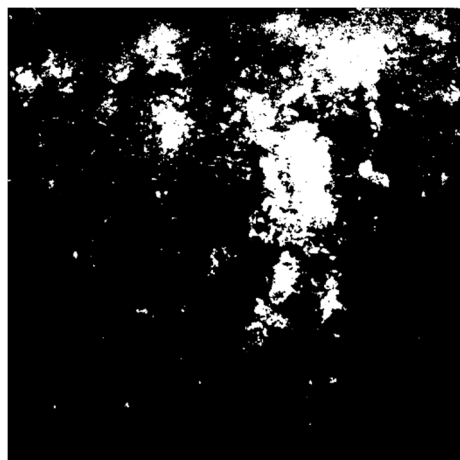


Figura 22. CS0_1

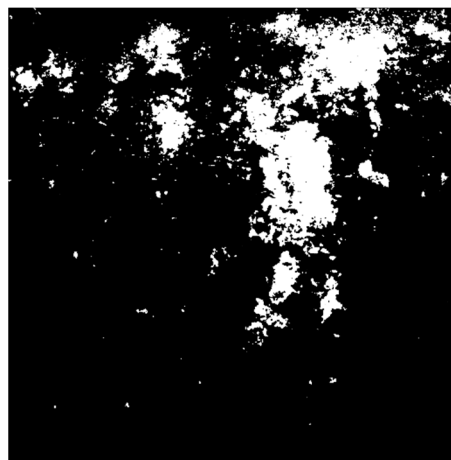


Figura 23. CS0_2

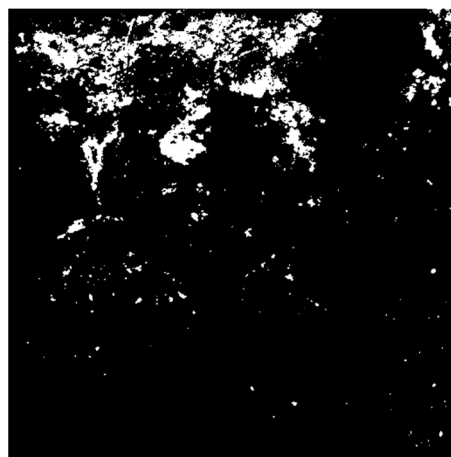
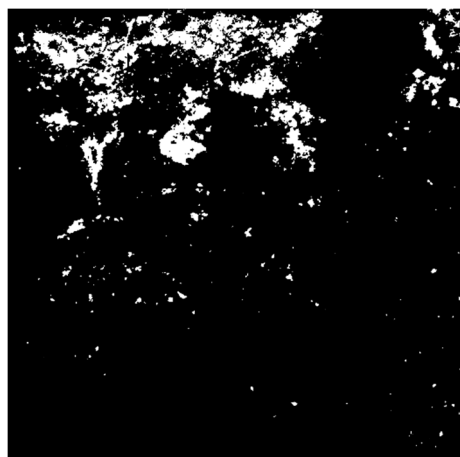


Figura 24. CS0_3

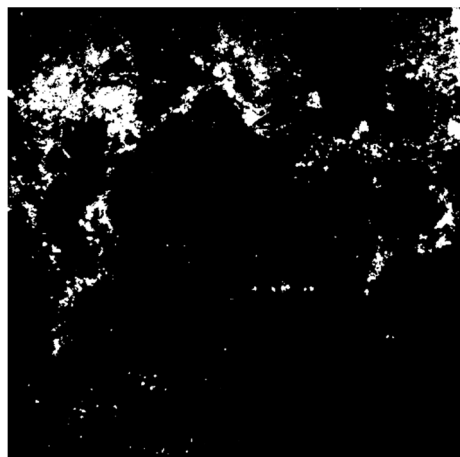


Figura 25. CS0_4

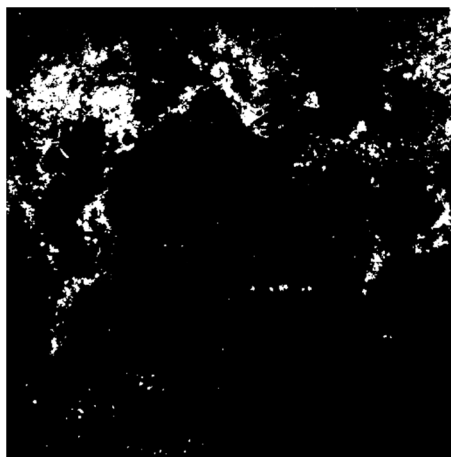


Figura 26. CS0_5

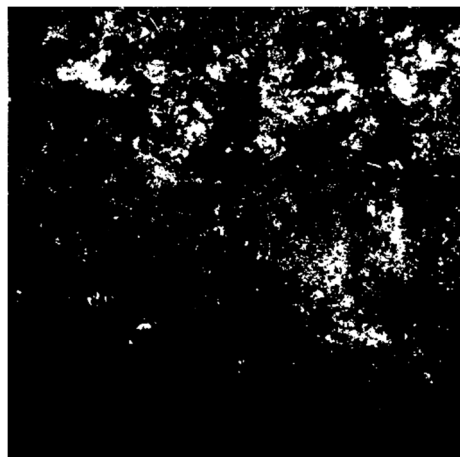


Figura 27. CS0_6

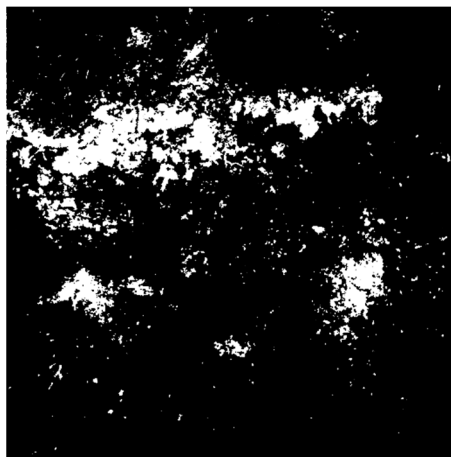


Figura 28. CS1_1

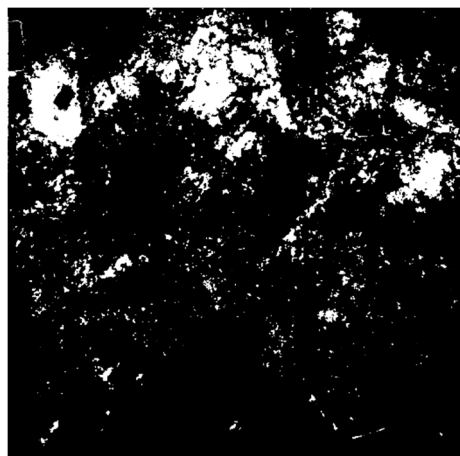


Figura 29. CS1_2

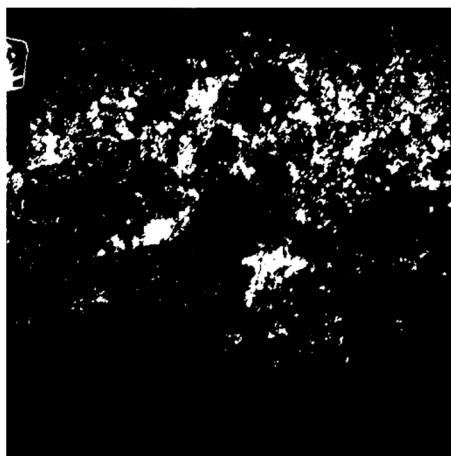


Figura 30. CS1_3

Figura 31. CS1_4

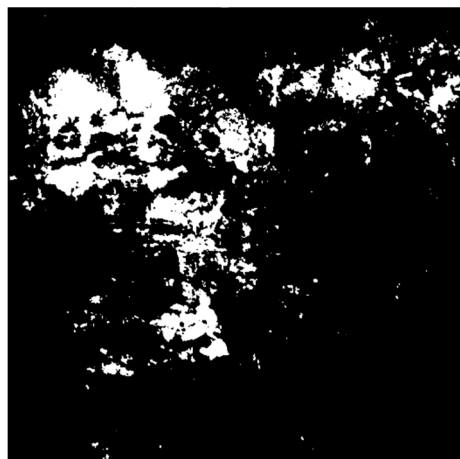


Figura 32. CS2_1



Figura 33. CS2_2

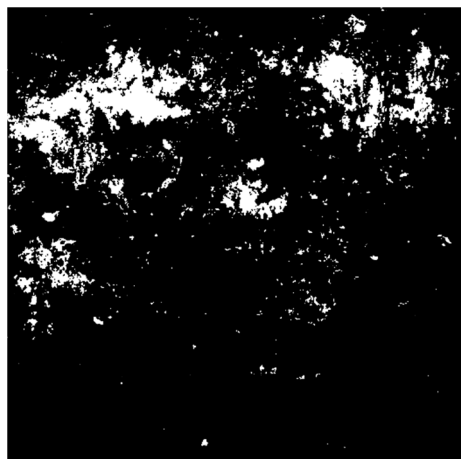


Figura 34. CS2_3

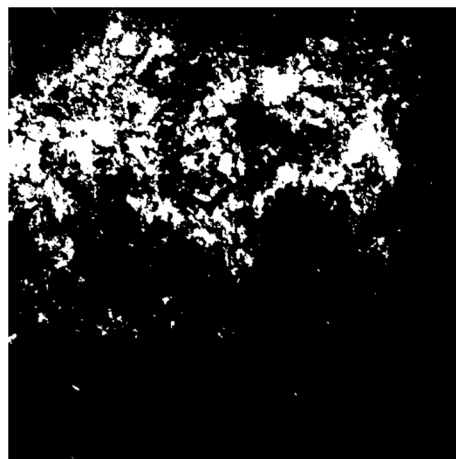


Figura 35. CS2_4



Figura 36. CS3_1



Figura 37. CS3_2



Figura 38. CS3_3

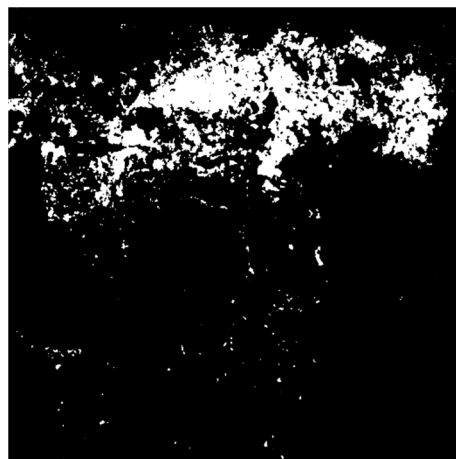


Figura 39. CS3_4

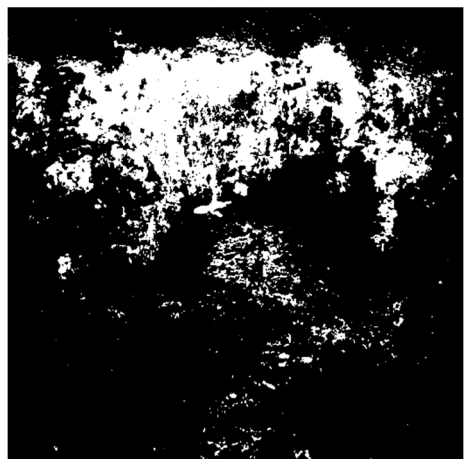


Figura 40. CS4_1



Figura 41. CS4_2



Figura 42. CS4_3



Figura 43. CS4_4

Vertedera

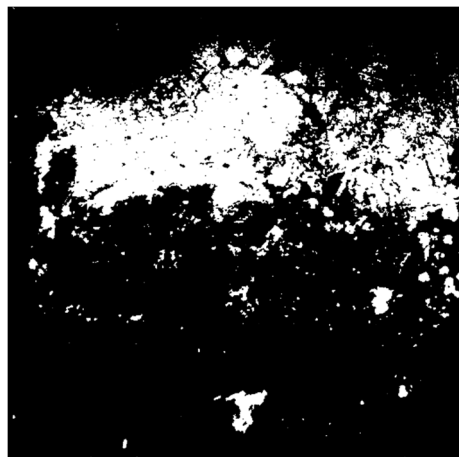


Figura 44. VS0_1

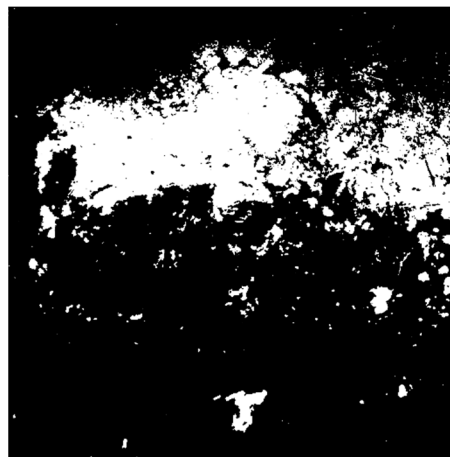


Figura 45. VS0_2

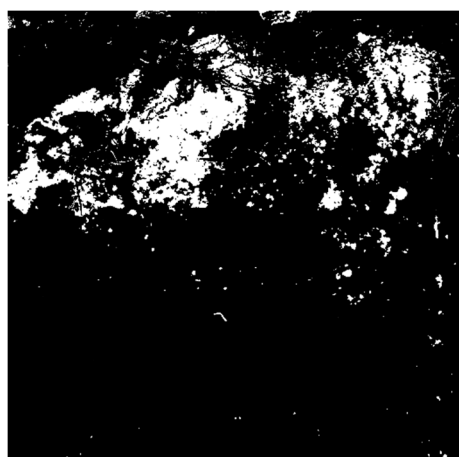


Figura 46. VS0_3

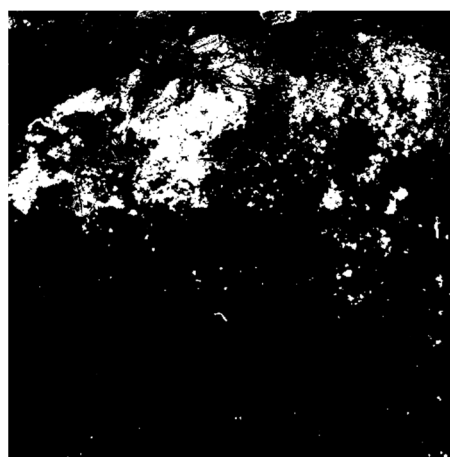


Figura 47. VS0_4

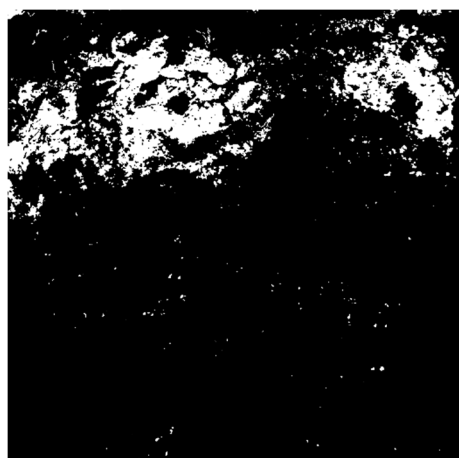


Figura 48. VS0_5

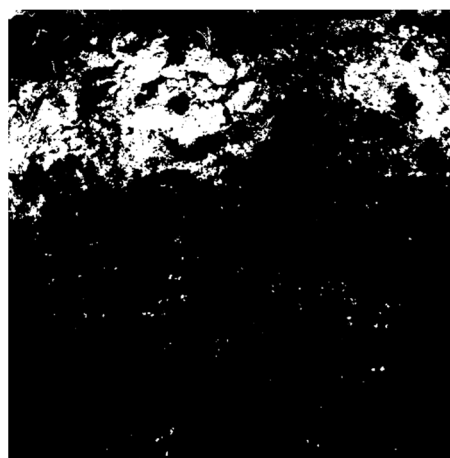


Figura 49. VS0_6

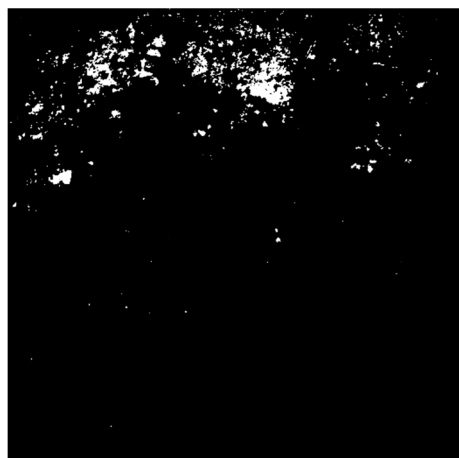


Figura 50. VS1_1

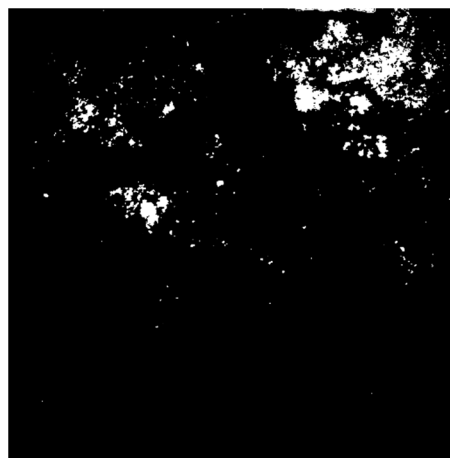


Figura 51. VS1_2

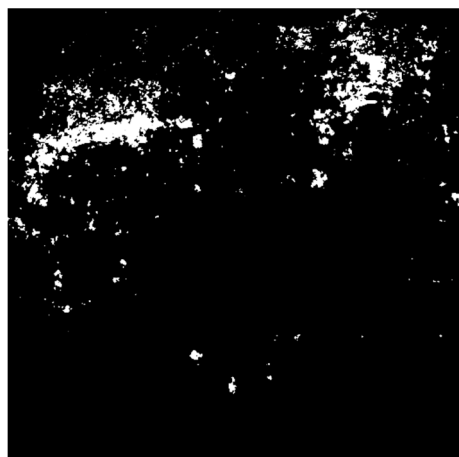


Figura 52. VS1_3

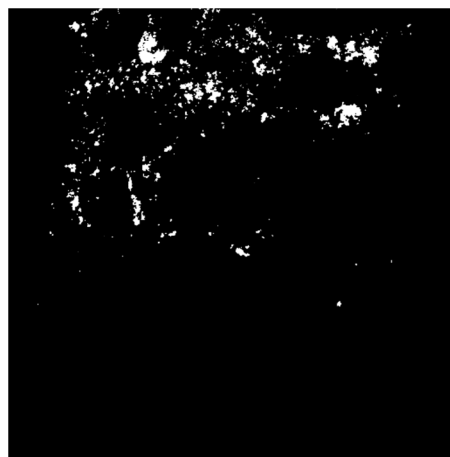


Figura 53. VS1_4

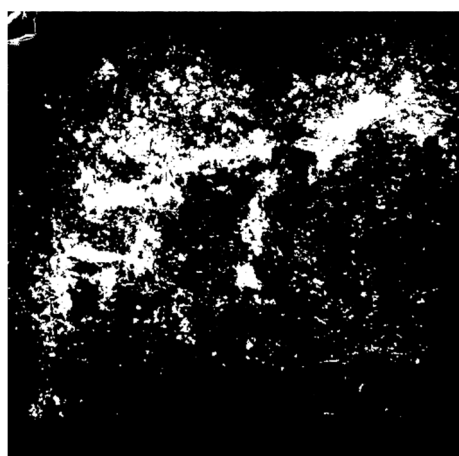


Figura 54. VS2_1

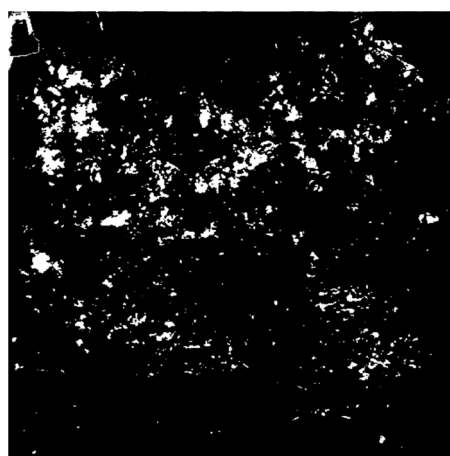


Figura 55. VS2_2

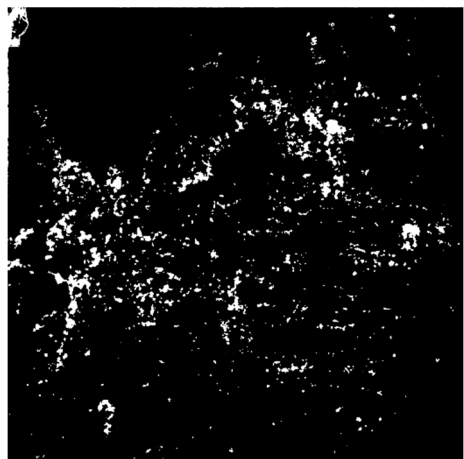


Figura 56. VS2_3

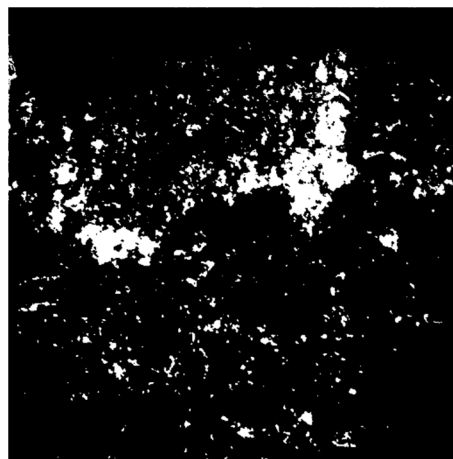


Figura 57. VS2_4

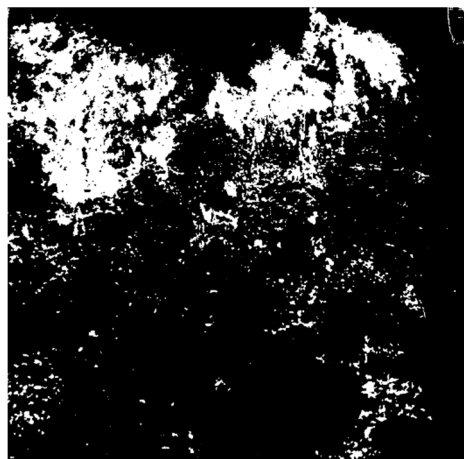


Figura 58. VS3_1



Figura 59. VS3_2

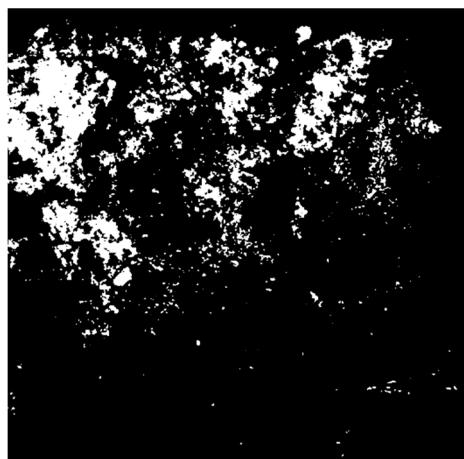


Figura 60. VS3_3

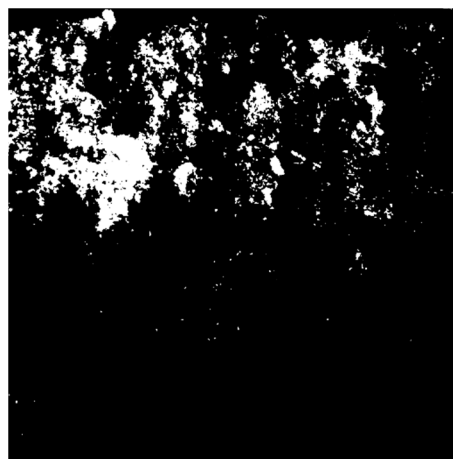


Figura 61. VS3_4



Figura 62. VS4_1

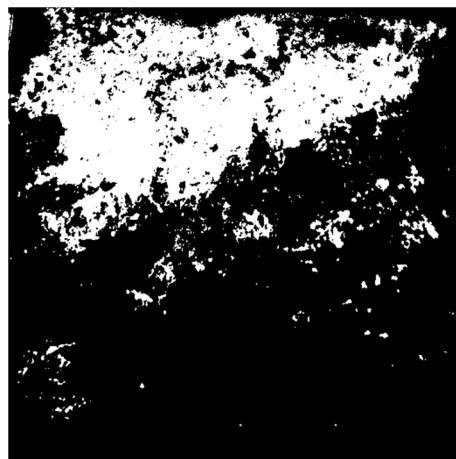


Figura 63. VS4_2

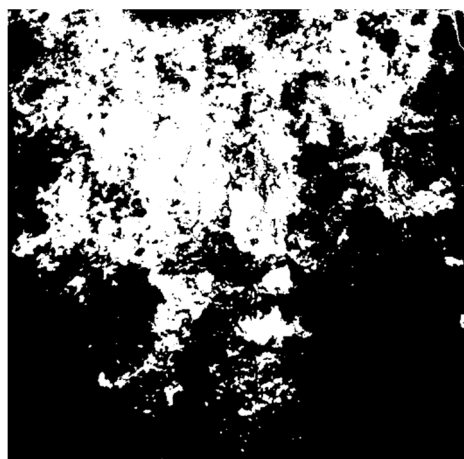


Figura 64. VS4_3



Figura 65. VS4_4

Rastra



Figura 66. RS0_1



Figura 67. RS0_2

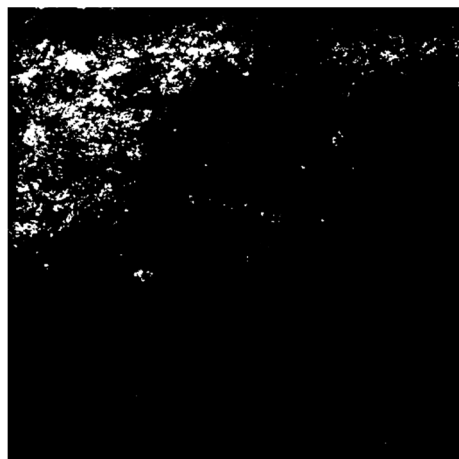


Figura 68. RS0_3



Figura 69. RS0_4

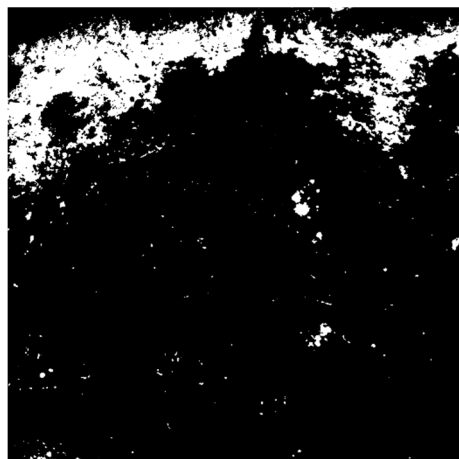


Figura 70. RS0_5

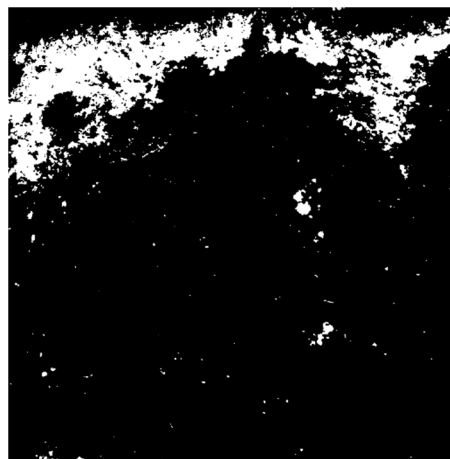


Figura 71. RS0_6

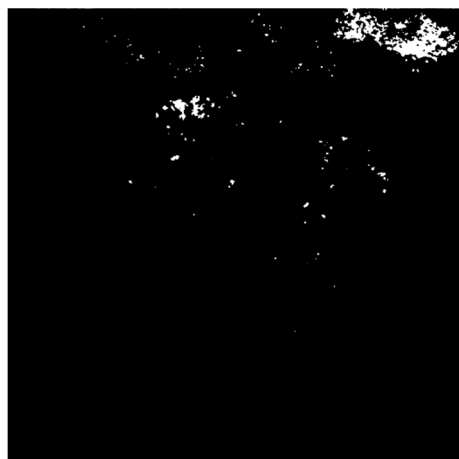


Figura 72. RS1_1

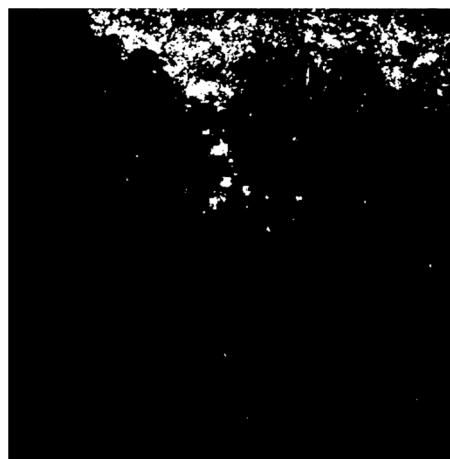


Figura 73. RS1_2



Figura 74. RS1_3

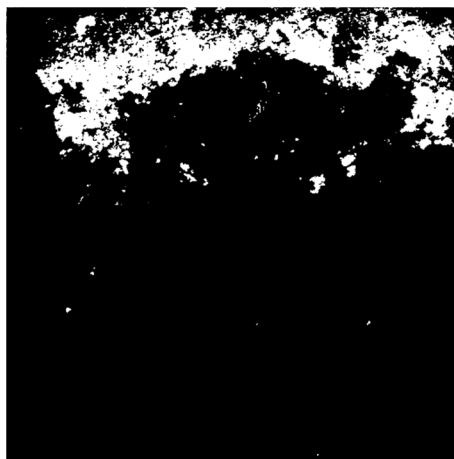


Figura 75. RS1_4

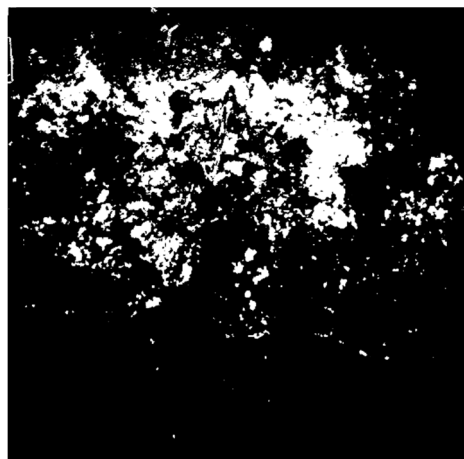


Figura 76. RS2_1



Figura 77. RS2_2

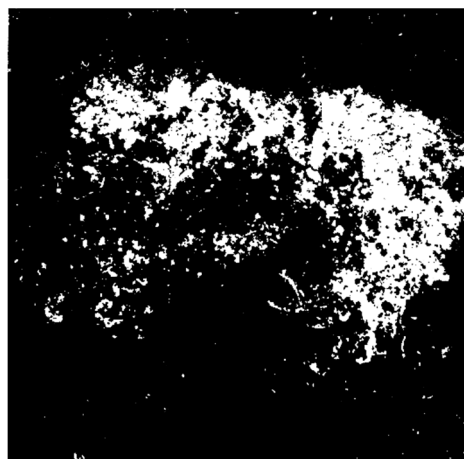


Figura 78. RS2_3



Figura 79. RS2_4

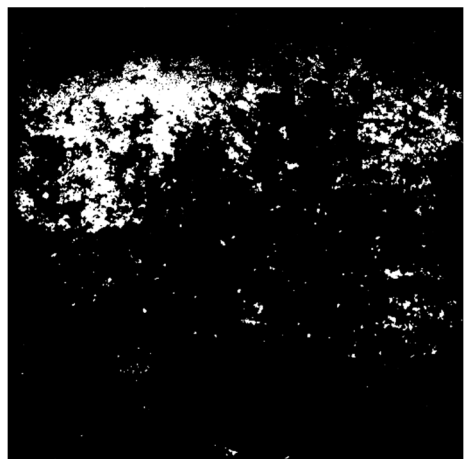


Figura 80. RS3_1



Figura 81. RS3_2

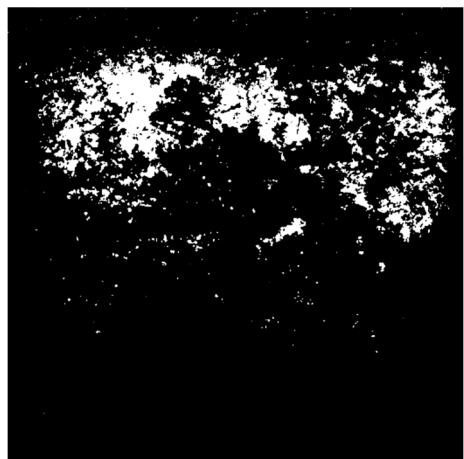


Figura 82. RS3_3

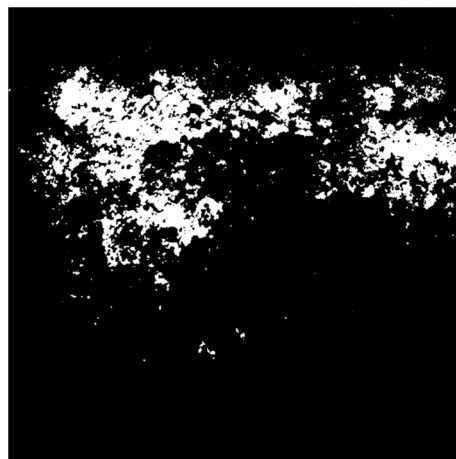


Figura 83. RS3_4



Figura 84. RS4_1



Figura 85. RS4_2

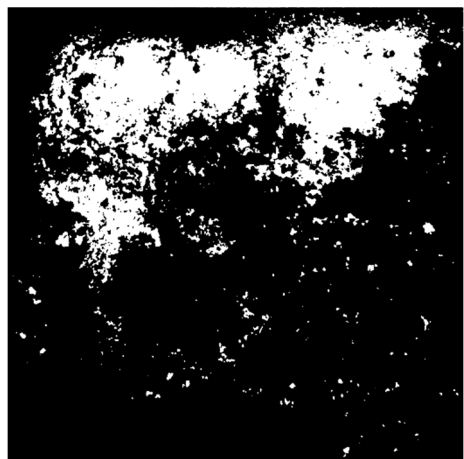


Figura 86. RS4_3

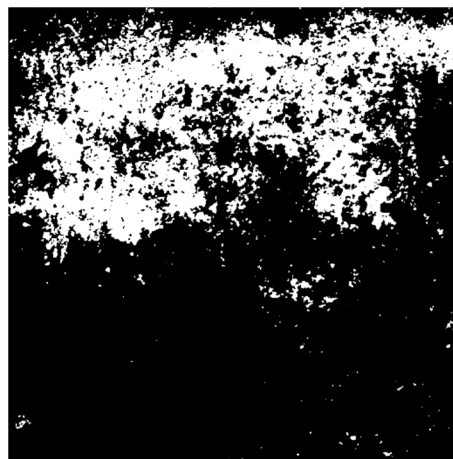


Figura 87. RS4_4

Zona húmeda

Chisel

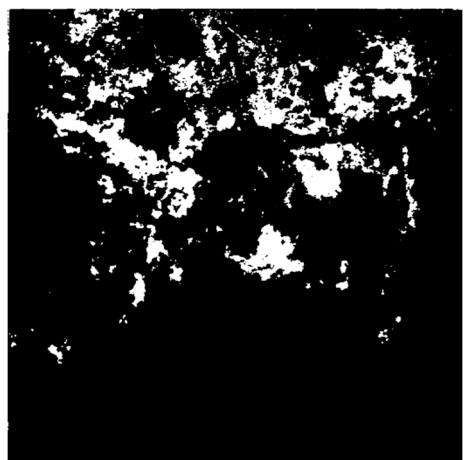


Figura 88. CP1_1

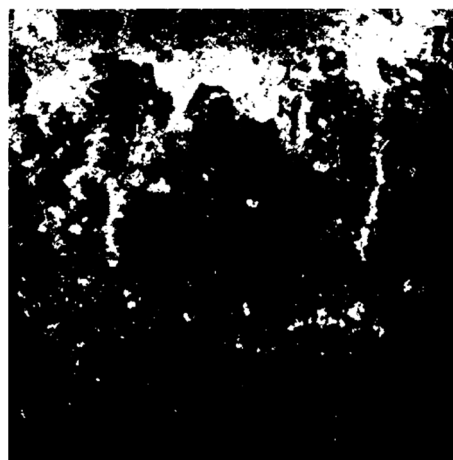


Figura 89. CP1_2

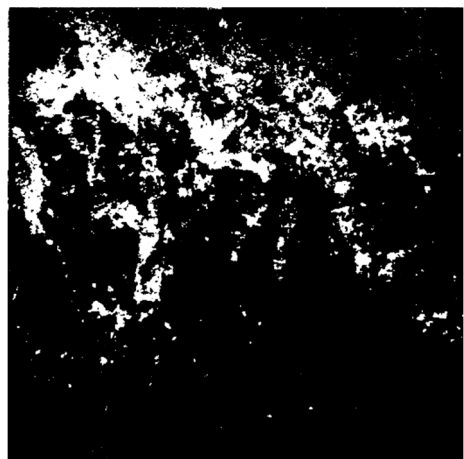


Figura 90. CP1_3

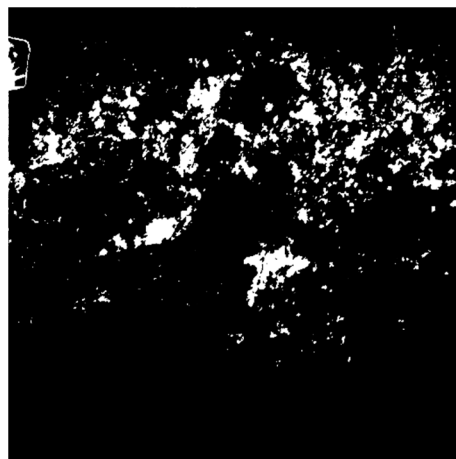


Figura 91. CP1_4

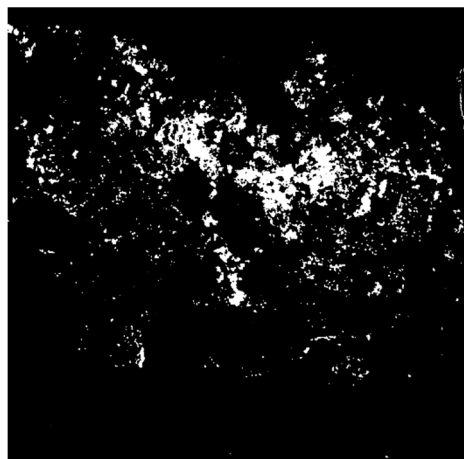


Figura 92. CP2_1

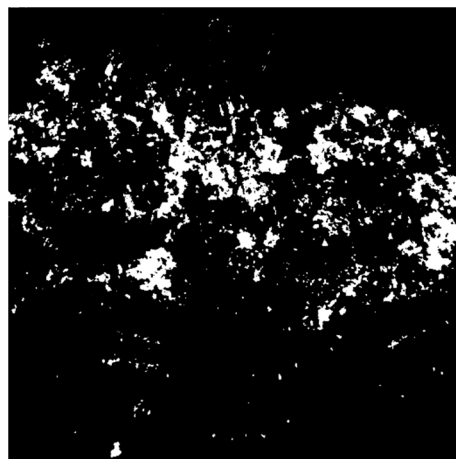


Figura 93. CP2_2

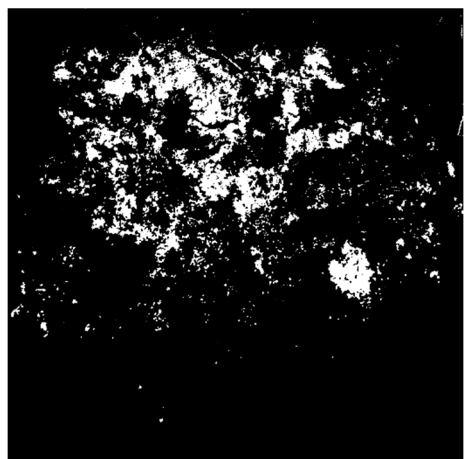


Figura 94. CP2_3

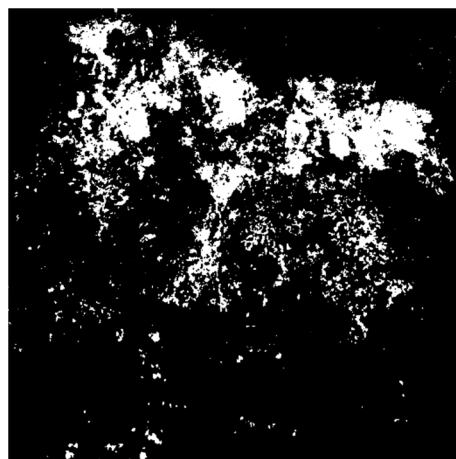


Figura 95. CP2_4



Figura 96. CP3_1

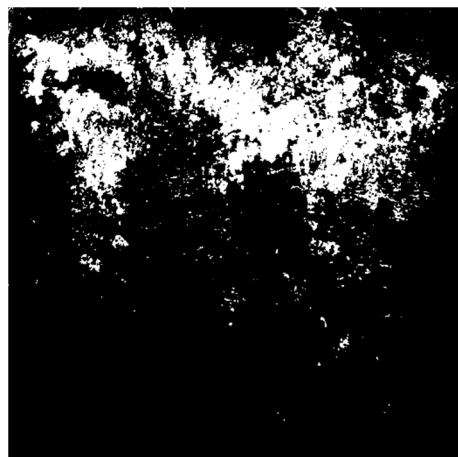


Figura 97. CP3_2



Figura 98. CP3_3

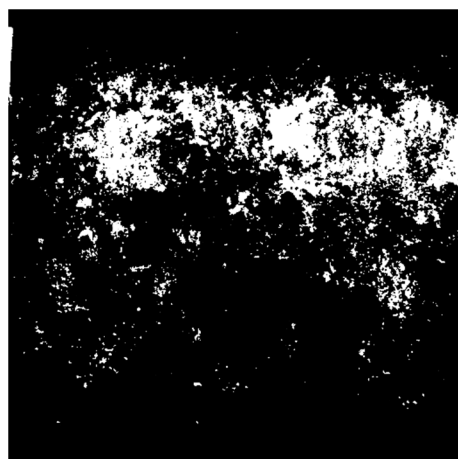


Figura 99. CP3_4



Figura 100. CP4_1

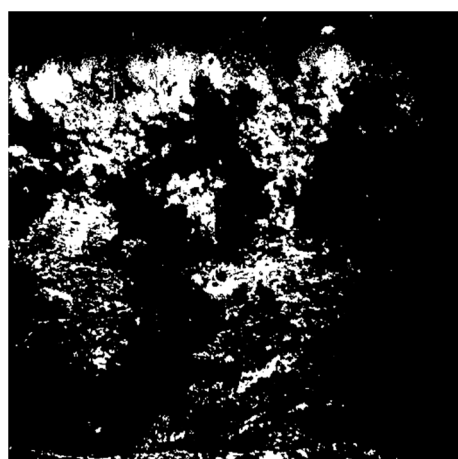


Figura 101. CP4_2

Vertedera

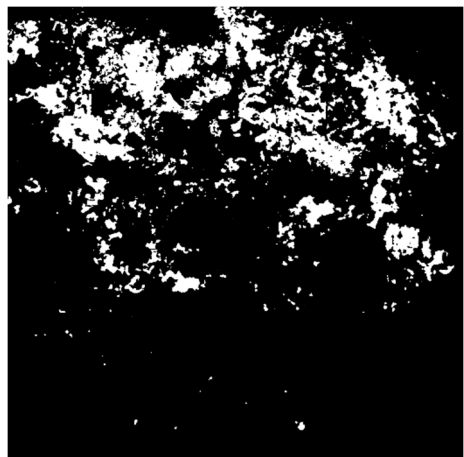


Figura 102. VP1_1

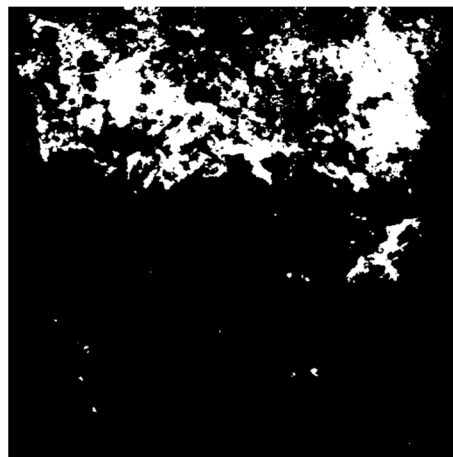


Figura 103. VP1_2

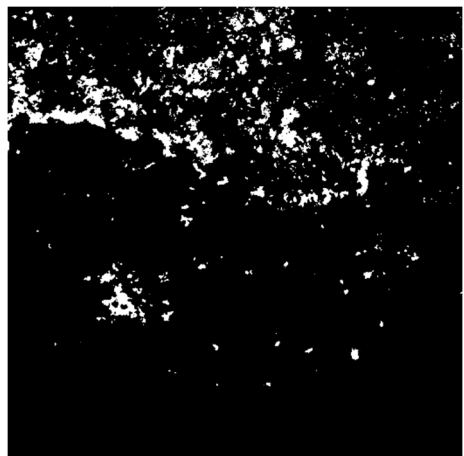


Figura 104. VP1_3

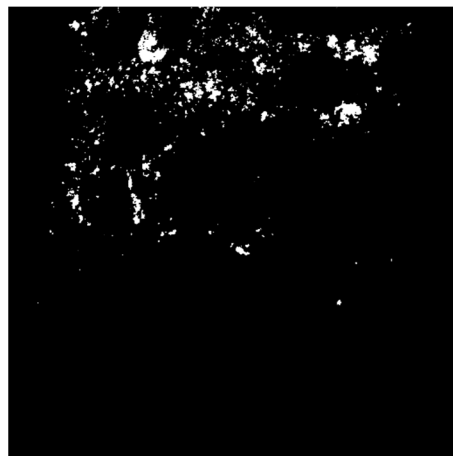


Figura 105. VP1_4

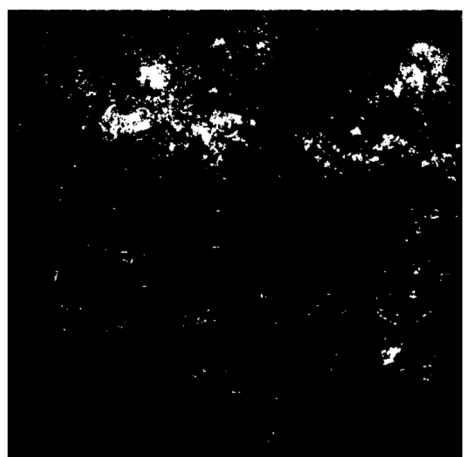


Figura 106. VP2_1

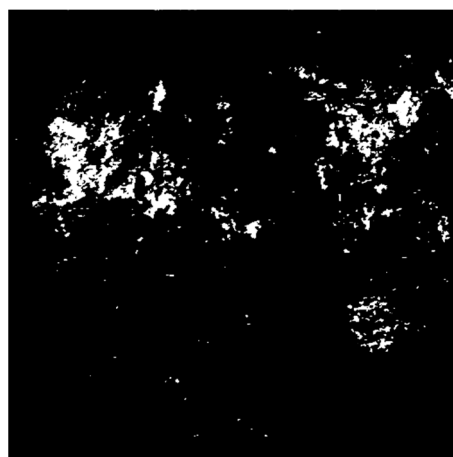


Figura 107. VP2_2

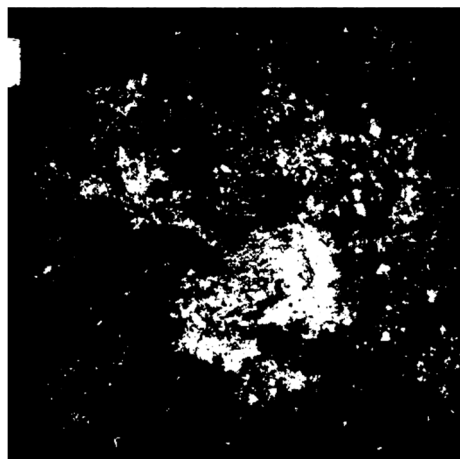


Figura 108. VP2_3

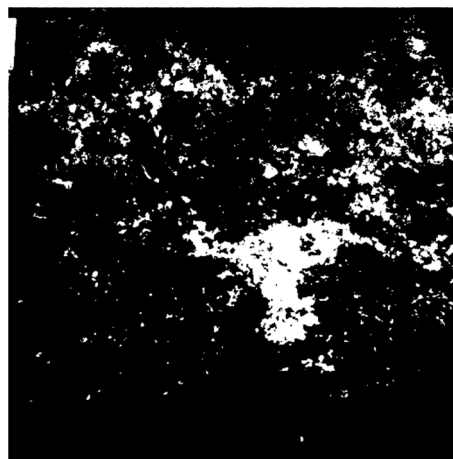


Figura 109. VP2_4

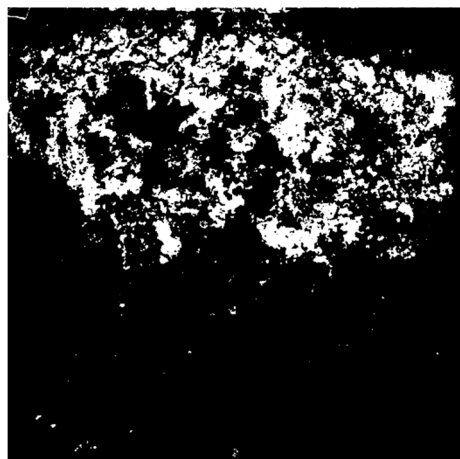


Figura 110. VP3_1

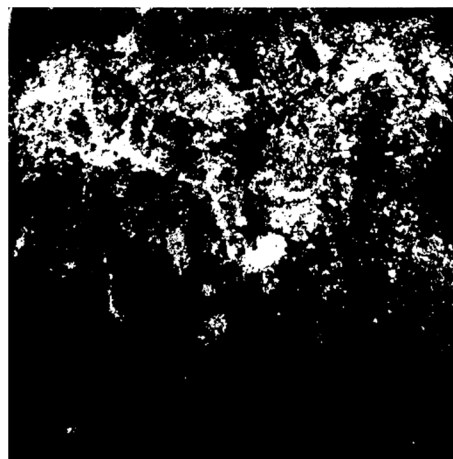


Figura 111. VP3_2

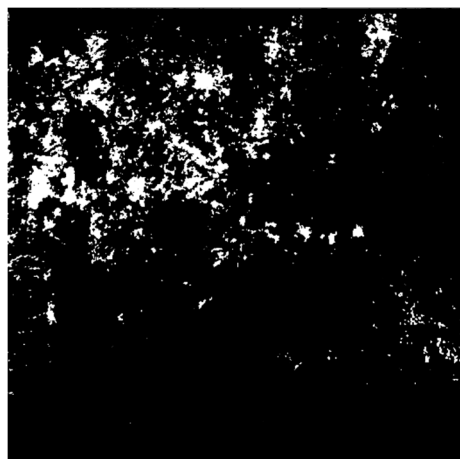


Figura 112. VP3_3

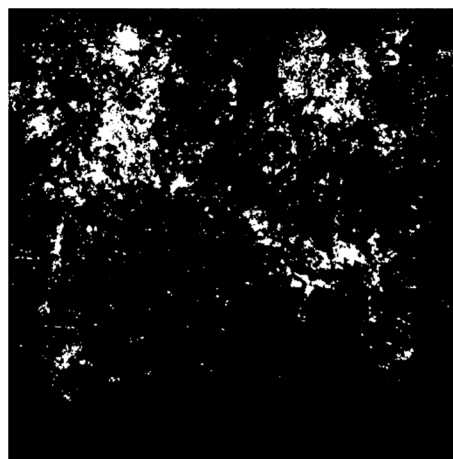


Figura 113. VP3_4



Figura 114. VP4_1



Figura 115. VP4_2

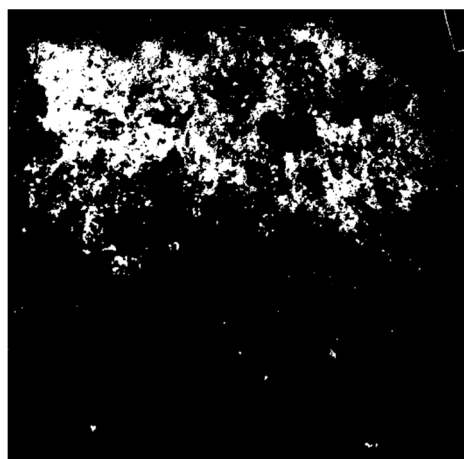


Figura 116. VP4_3

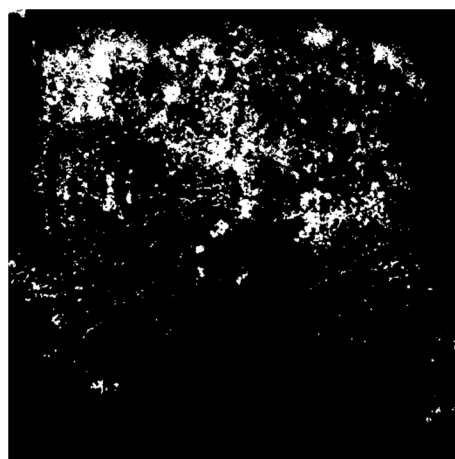


Figura 117. VP4_4

Rastra

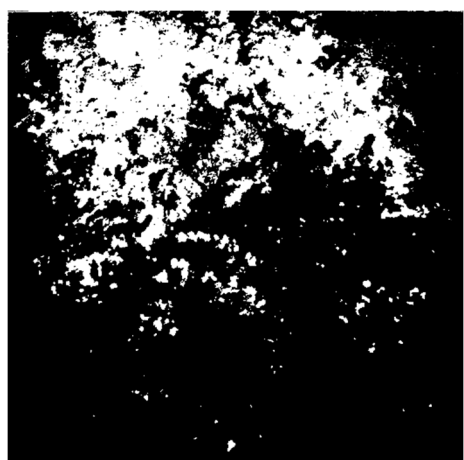


Figura 118. RP1_1

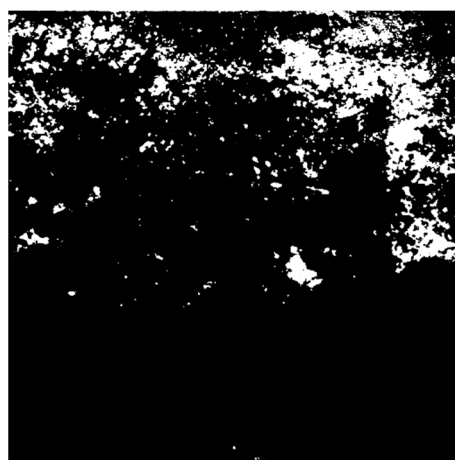


Figura 119. RP1_2



Figura 120. RP1_3



Figura 121. RP1_4



Figura 122. RP2_1

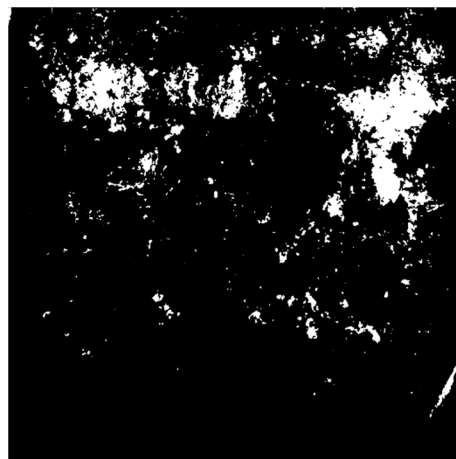


Figura 123. RP2_2



Figura 124. RP2_3

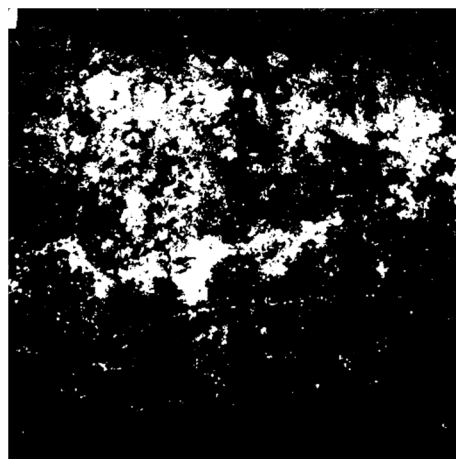


Figura 125. RP2_4

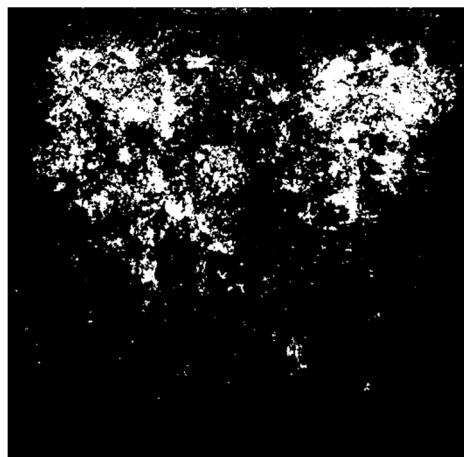


Figura 126. RP3_1

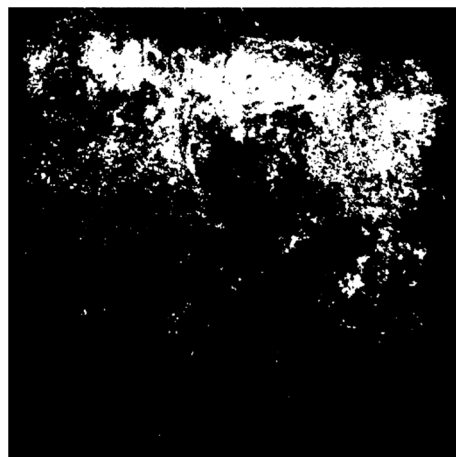


Figura 127. RP3_2

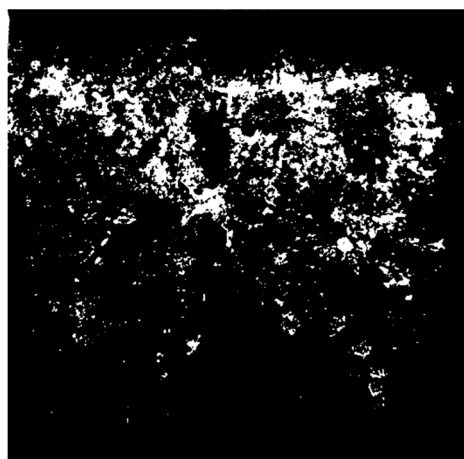


Figura 128. RP3_3

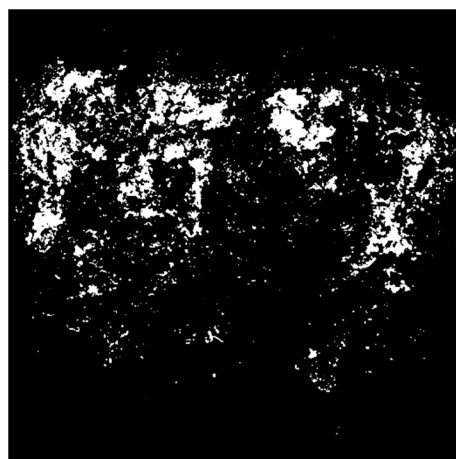


Figura 129. RP3_4

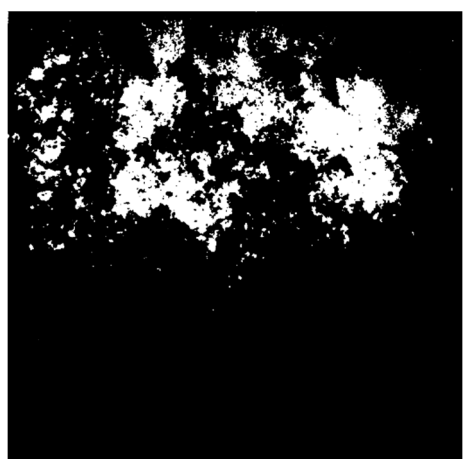


Figura 130. RP4_1



Figura 131. RP4_2

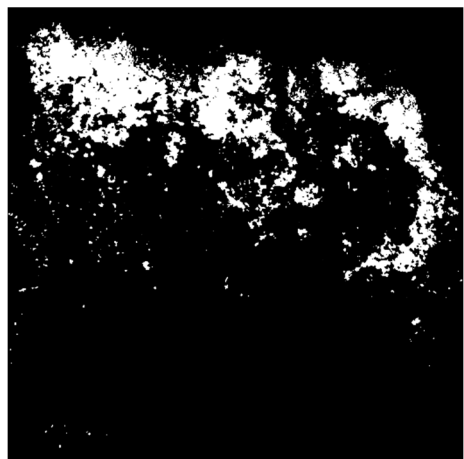


Figura 132. RP4_3



Figura 133. RP4_4

Universidad Pública de Navarra
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS AGRONOMOS

Nafarroako Unibertsitate Publikoa
NEKAZARITZAKO INGENIARIEN
GOI MAILAKO ESKOLA TEKNIKO



Anexo 2

Resultados individuales de los tratamientos

Presentado por:

IBAN ITURRIA AGUINAGA

MASTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA AGRONÓMICA

ANEXO 2: RESULTADOS GRÁFICOS DE LOS TRATAMIENTOS

En este anexo se muestran los resultados gráficos de los ensayos. Primero se muestran los resultados individuales de cada ensayo con sus correspondientes barras de variación, y posteriormente se muestran los resultados comparativos únicamente con las medias. A modo de resumen en la siguiente tabla 7 se muestra la nomenclatura de cada ensayo.

Tabla 7. Nomenclatura de cada tratamiento.

Nomenclatura	Tratamiento
SD	Suelo sin laboreo
CS	Chisel zona seca
VS	Vertedera zona seca
RS	Vertedera+Rastra con molón zona seca
CP	Chisel zona húmeda
VP	Vertedera zona húmeda
RP	Vertedera+Rastra con molón zona húmeda

*Cada uno de los tratamientos anteriores lleva un número indicando el número de ensayo, y seguido de un guion bajo el número de corte (Ej. CS1_1).

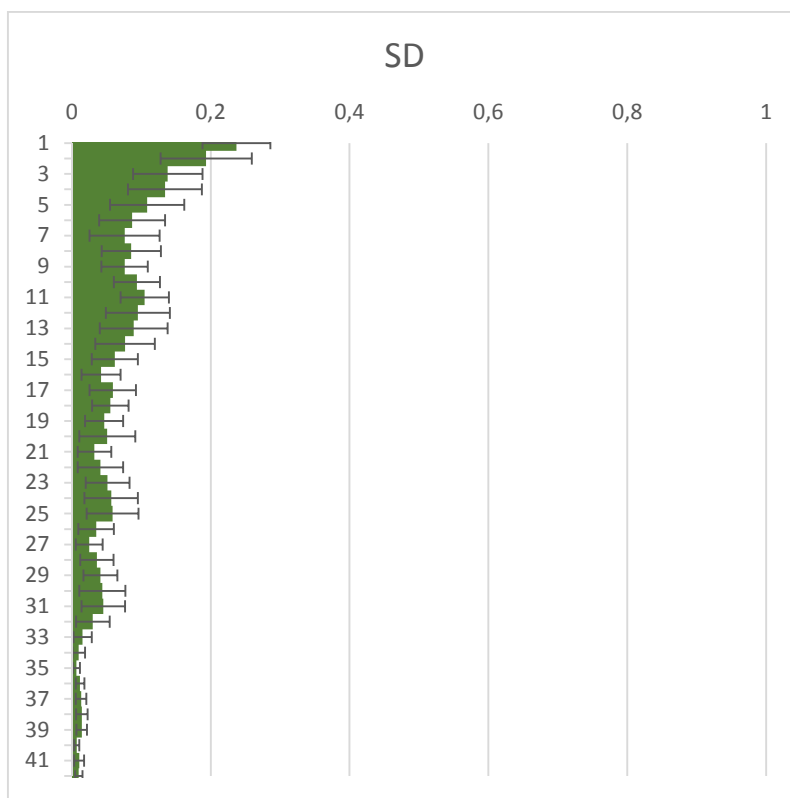


Figura 134. Resultados individuales del ensayo SD0.

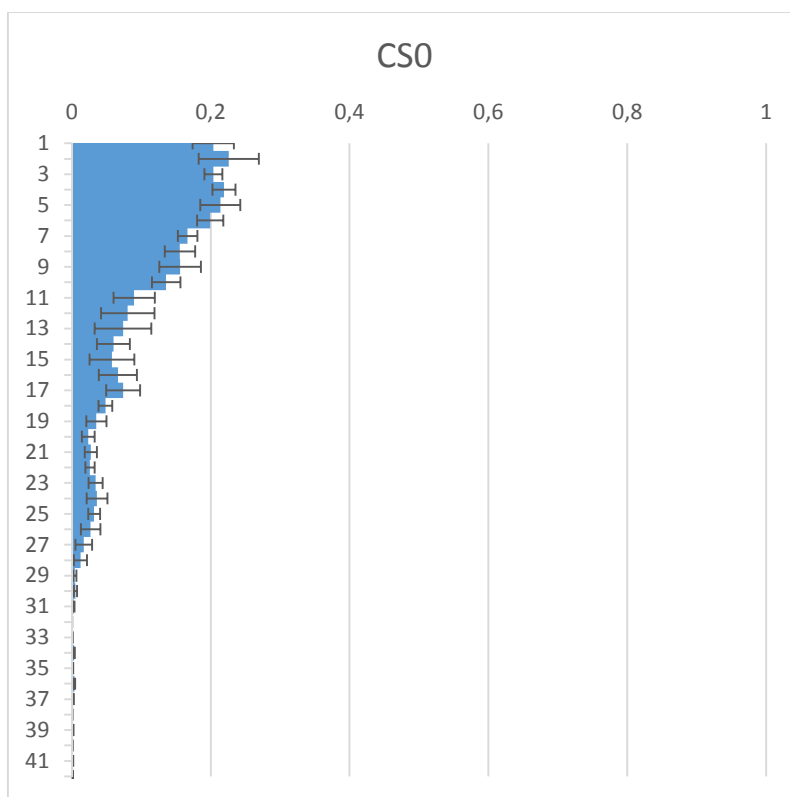


Figura 135. Resultados individuales del ensayo CS0.

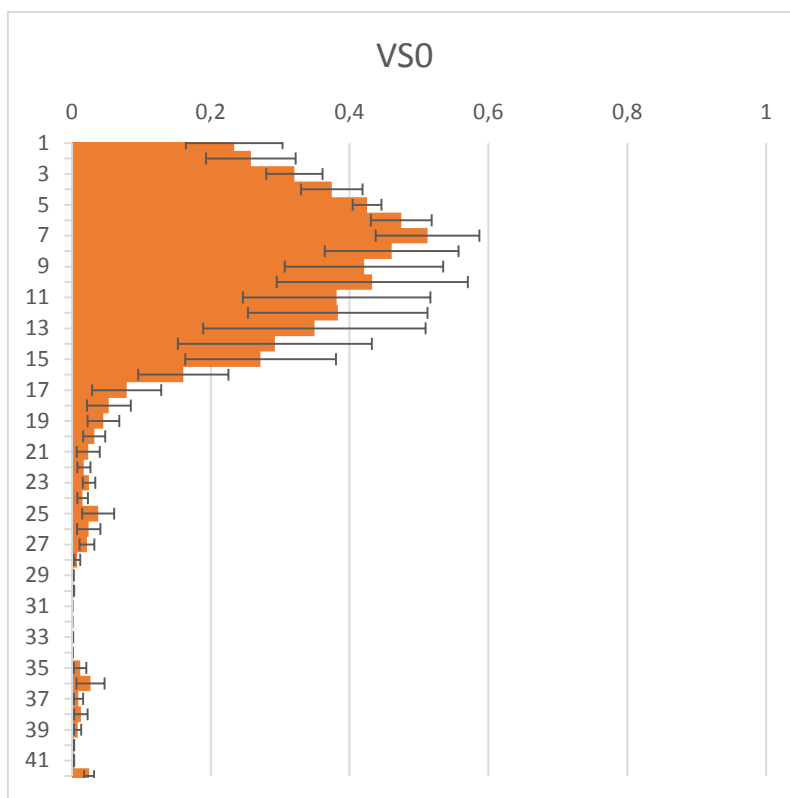


Figura 136. Resultados individuales del ensayo VS0.

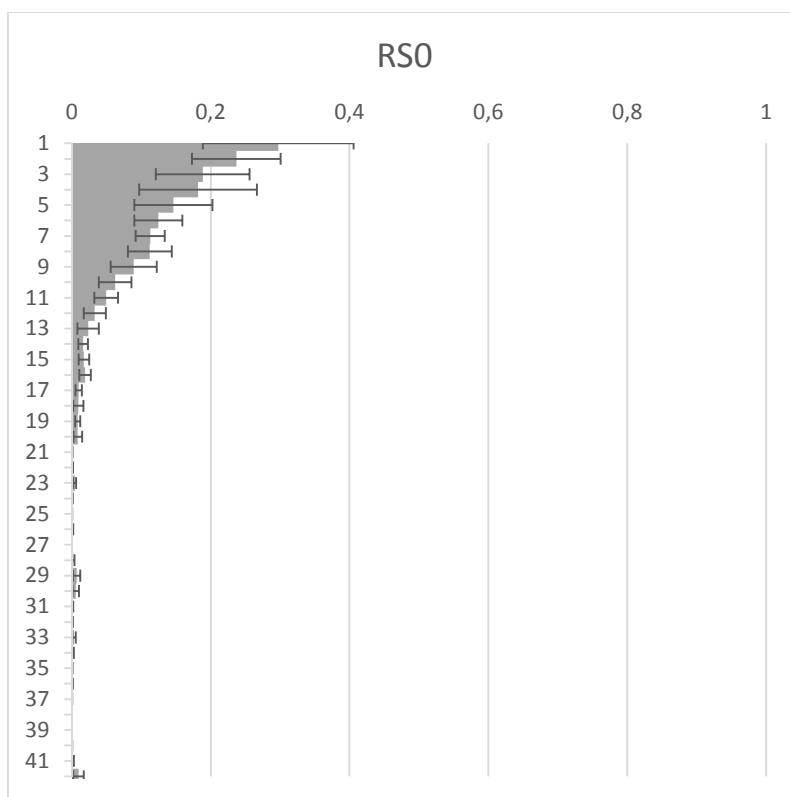


Figura 137. Resultados individuales del ensayo RS0.

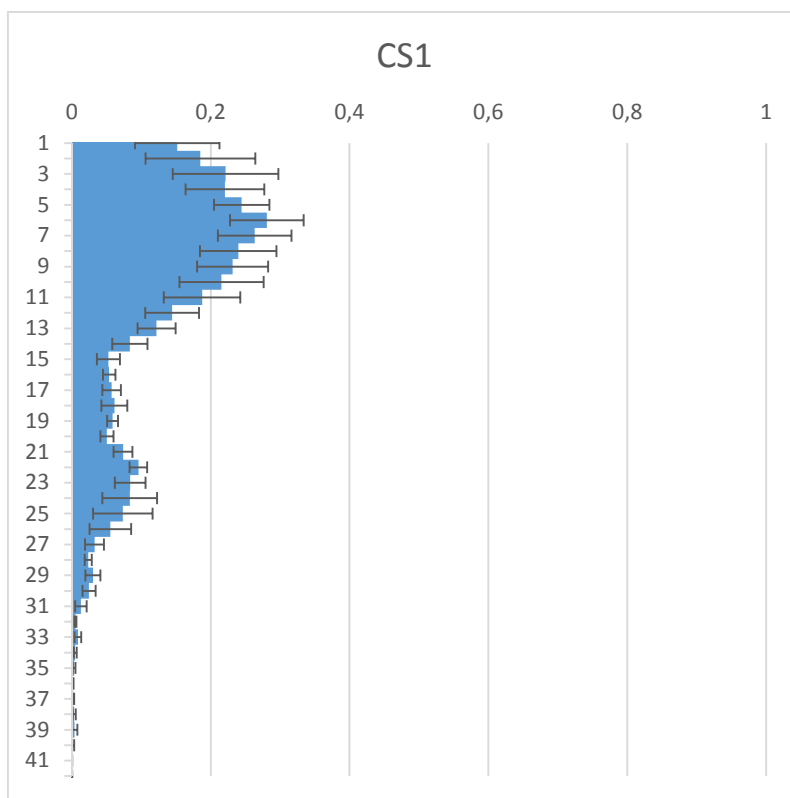


Figura 138. Resultados individuales del ensayo CS1.

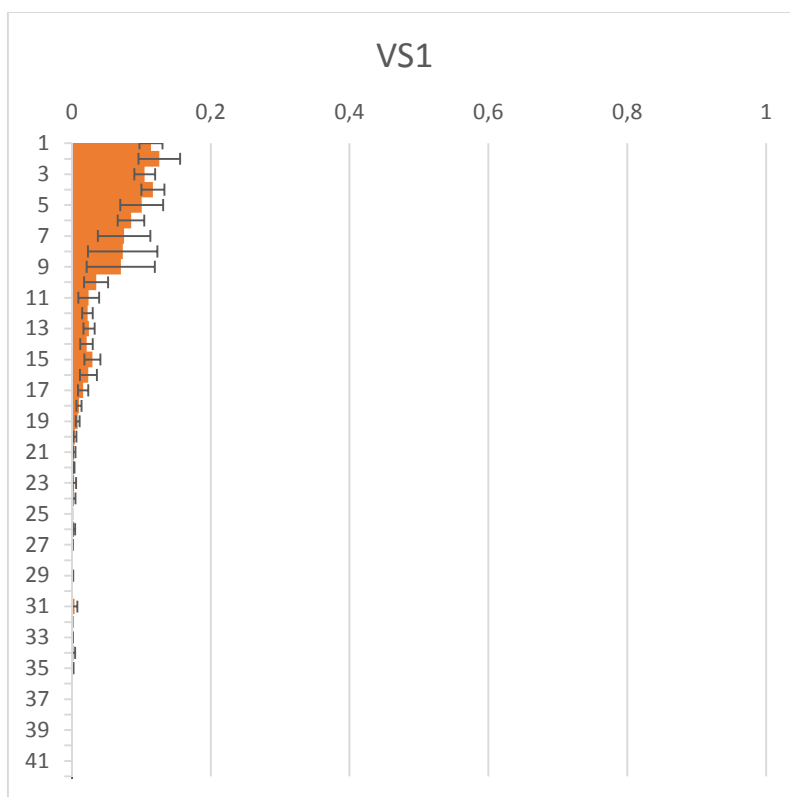


Figura 139. Resultados individuales del ensayo VS1.

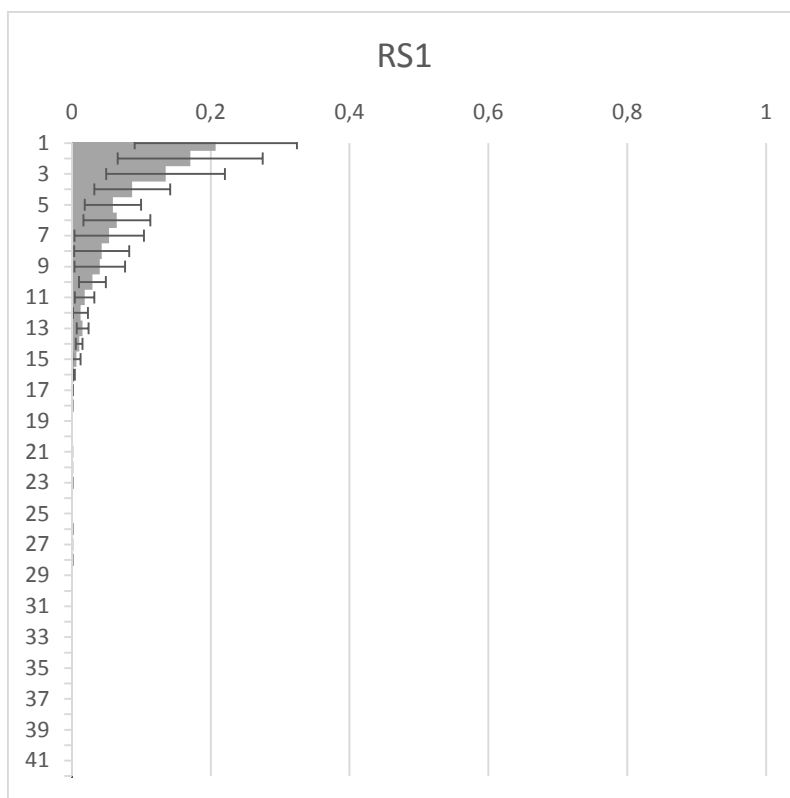


Figura 140. Resultados individuales del ensayo RS1.

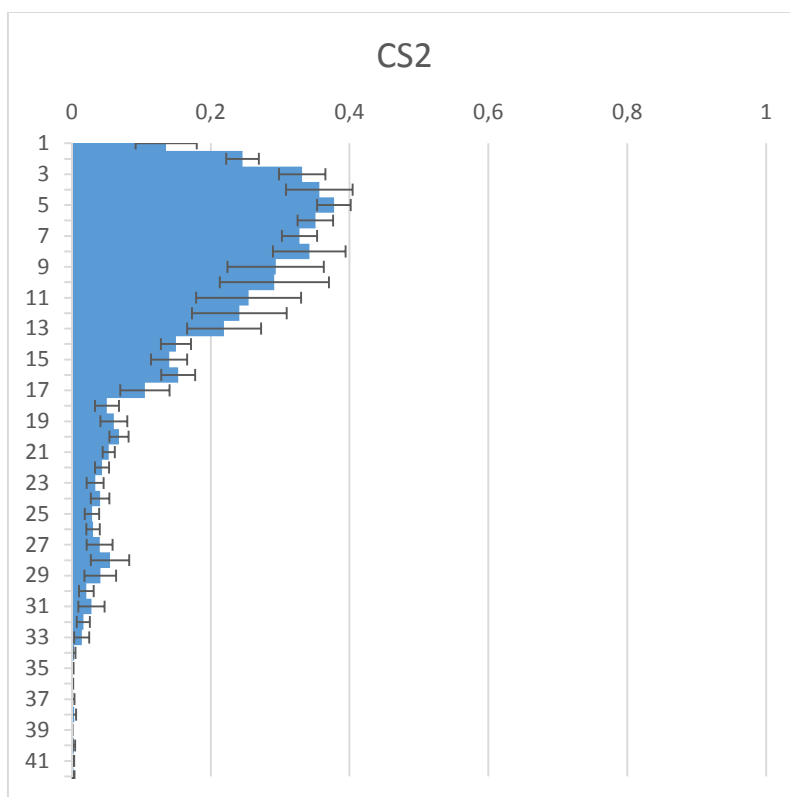


Figura 141. Resultados individuales del ensayo CS2.

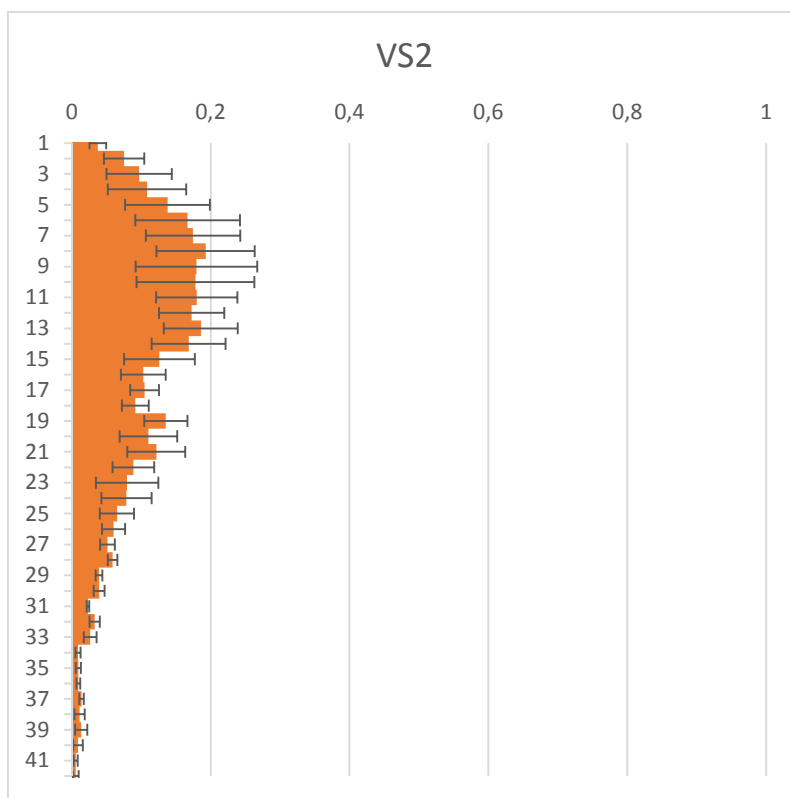


Figura 142. Resultados individuales del ensayo VS2.

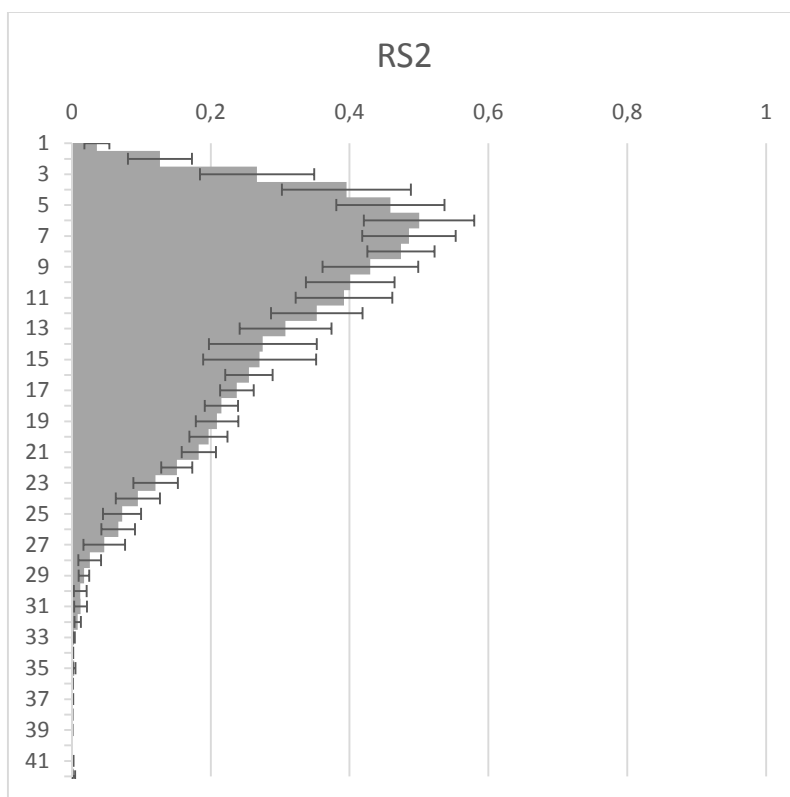


Figura 143. Resultados individuales del ensayo RS2.

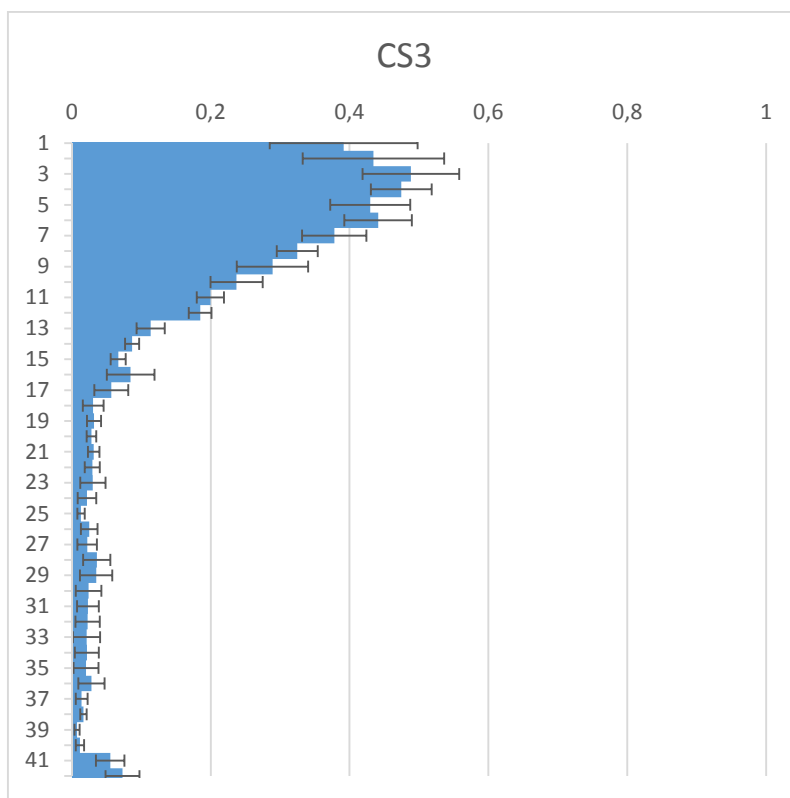


Figura 144. Resultados individuales del ensayo CS3.

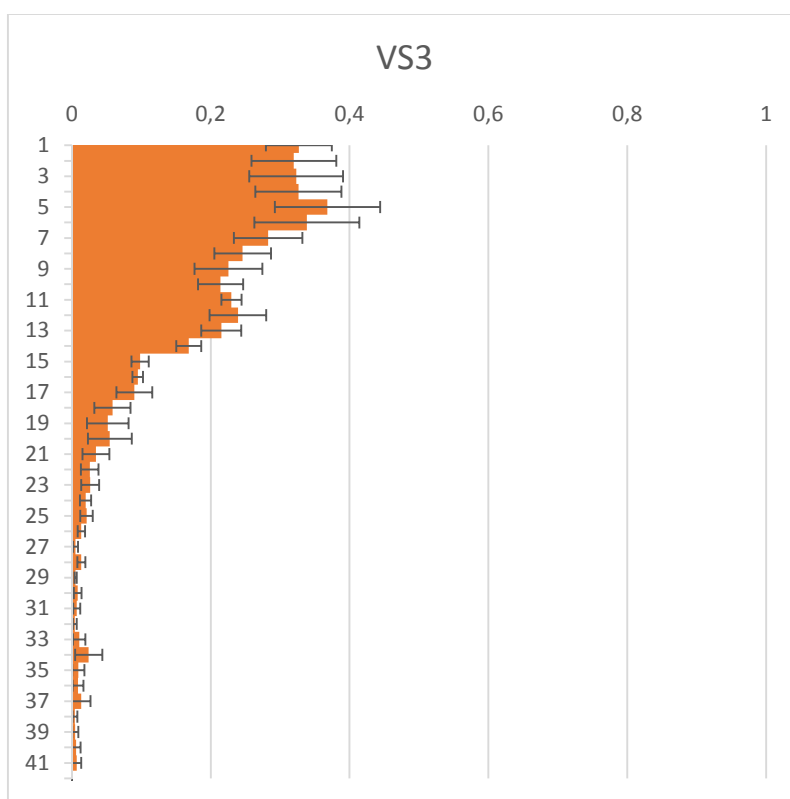


Figura 145. Resultados individuales del ensayo VS3.

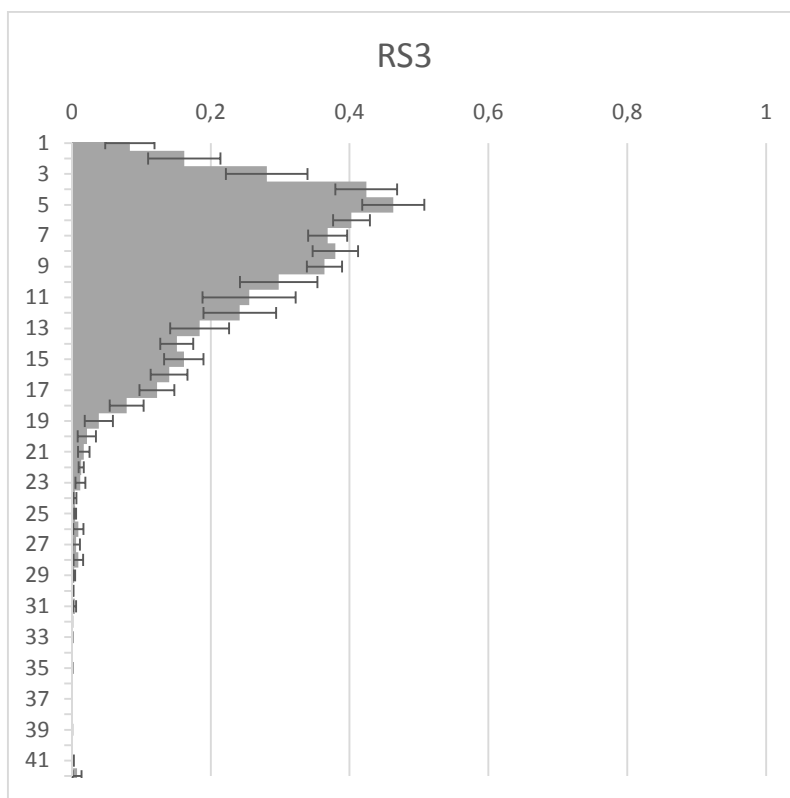


Figura 146. Resultados individuales del ensayo RS3.

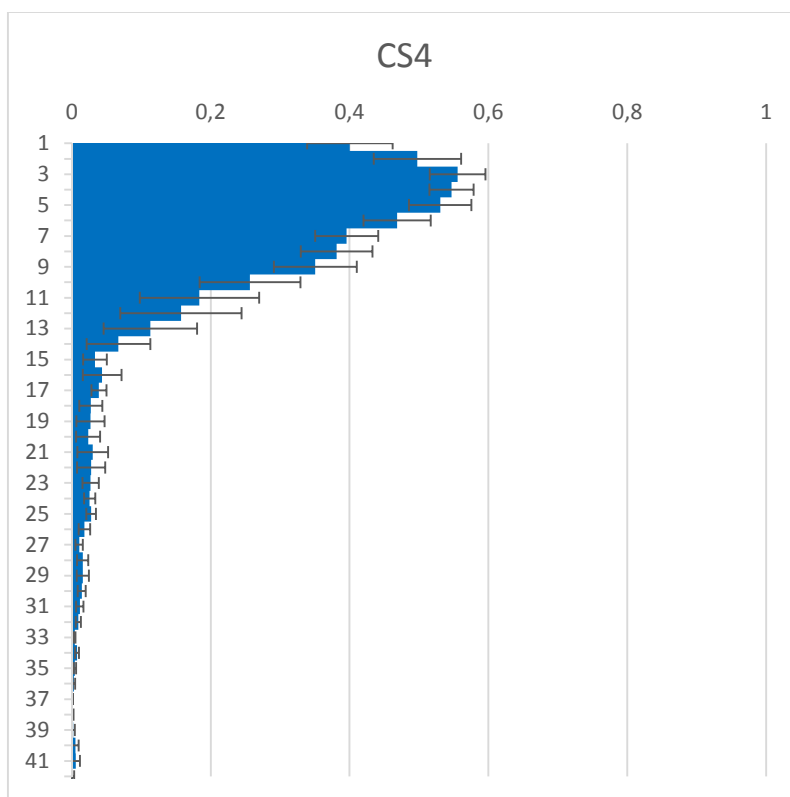


Figura 147. Resultados individuales del ensayo CS4.

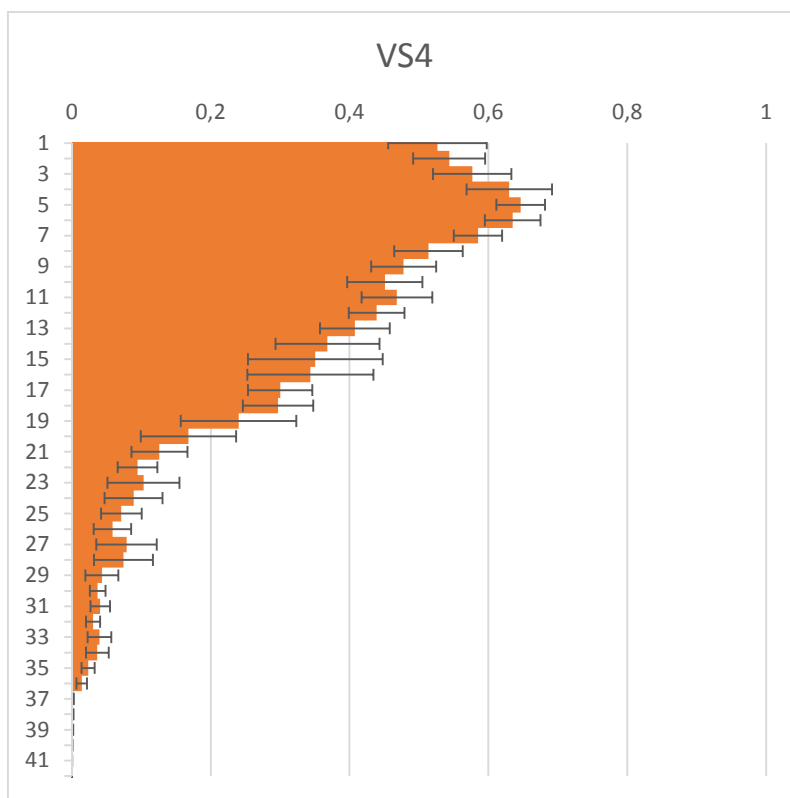


Figura 148. Resultados individuales del ensayo VS4.

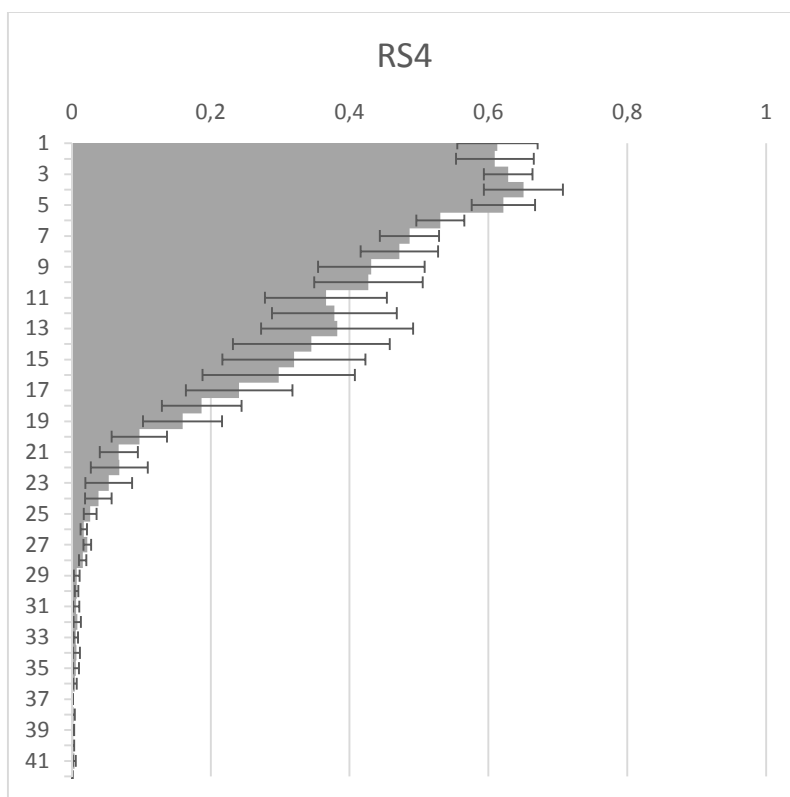


Figura 149. Resultados individuales del ensayo RS4.

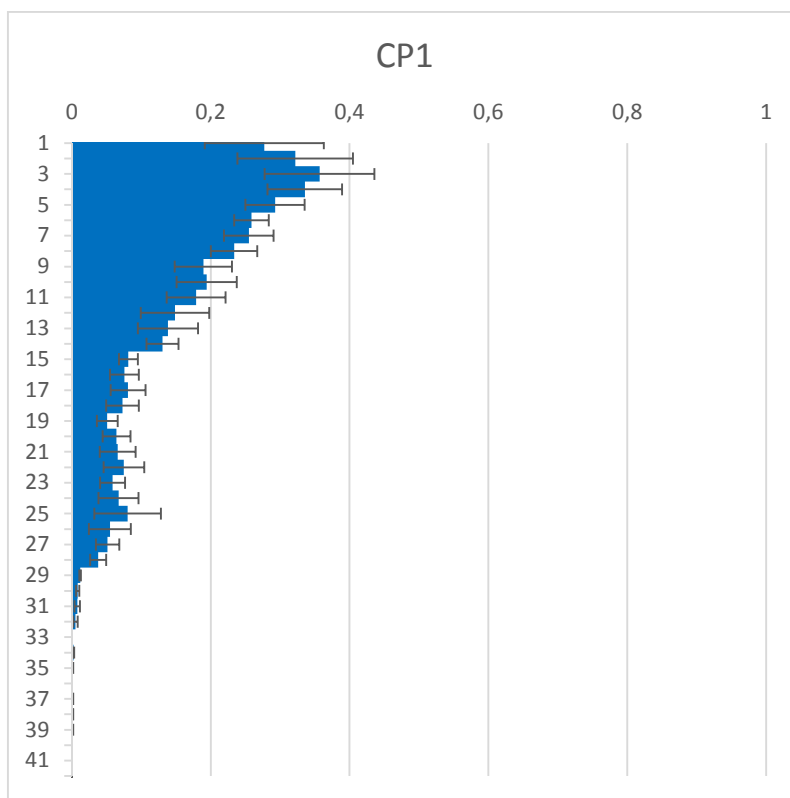


Figura 150. Resultados individuales del ensayo CP1.

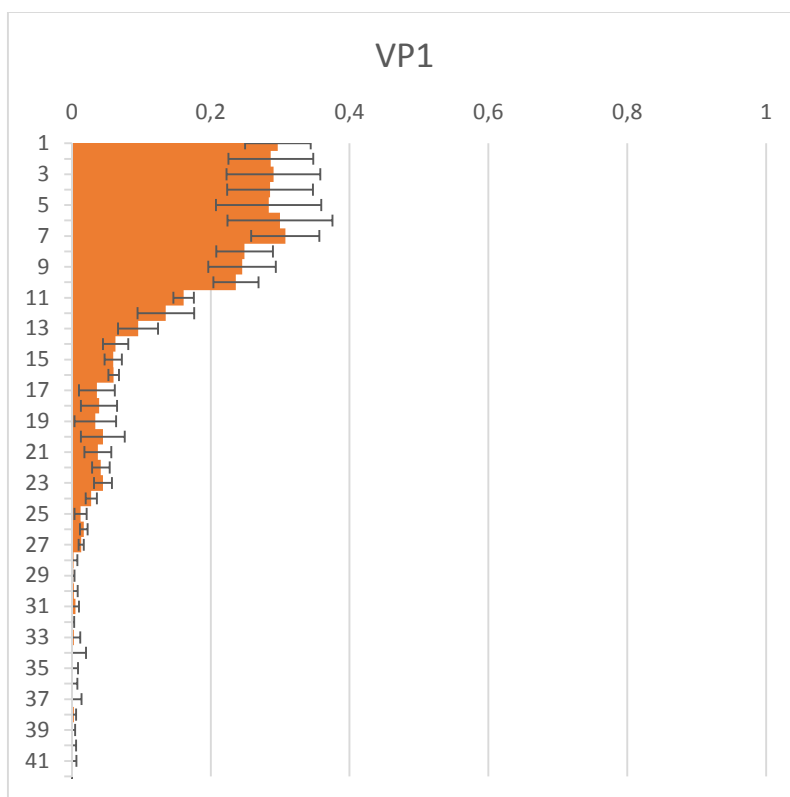


Figura 151. Resultados individuales del ensayo VP1.

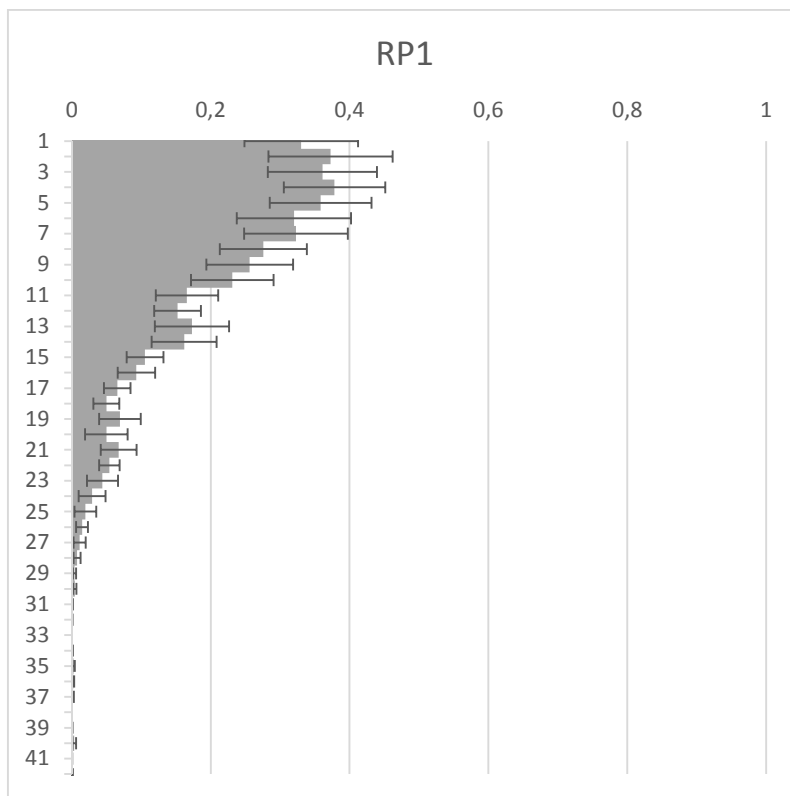


Figura 152. Resultados individuales del ensayo RP1.

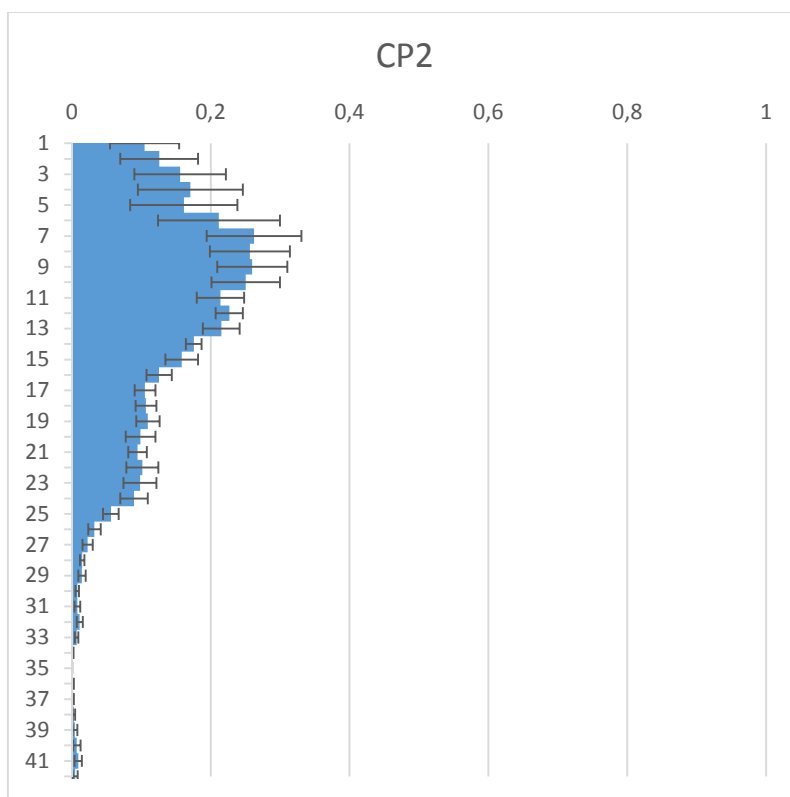


Figura 153. Resultados individuales del ensayo CP2.

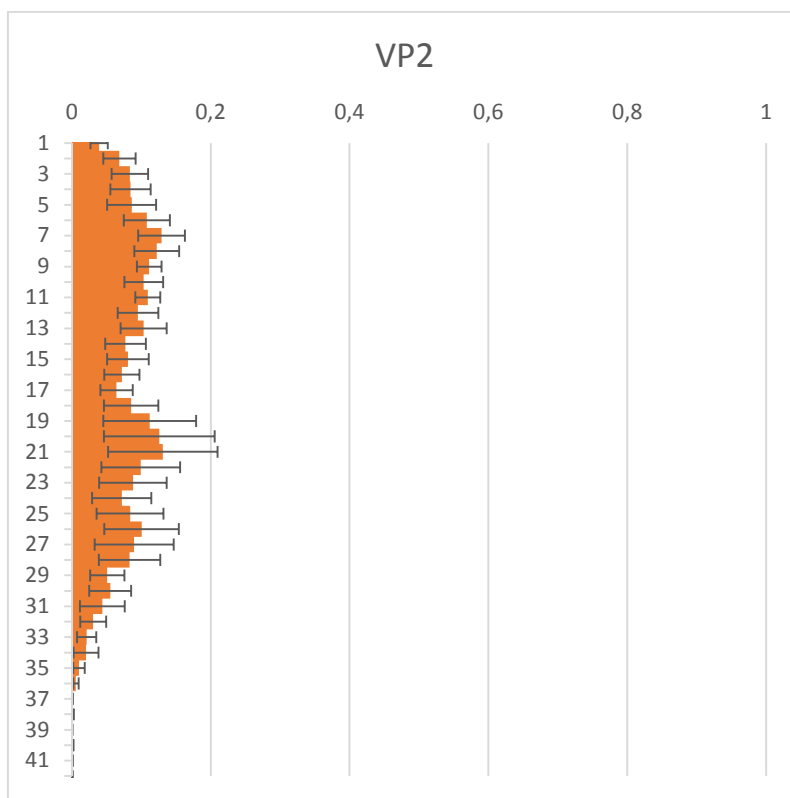


Figura 154. Resultados individuales del ensayo VP2.

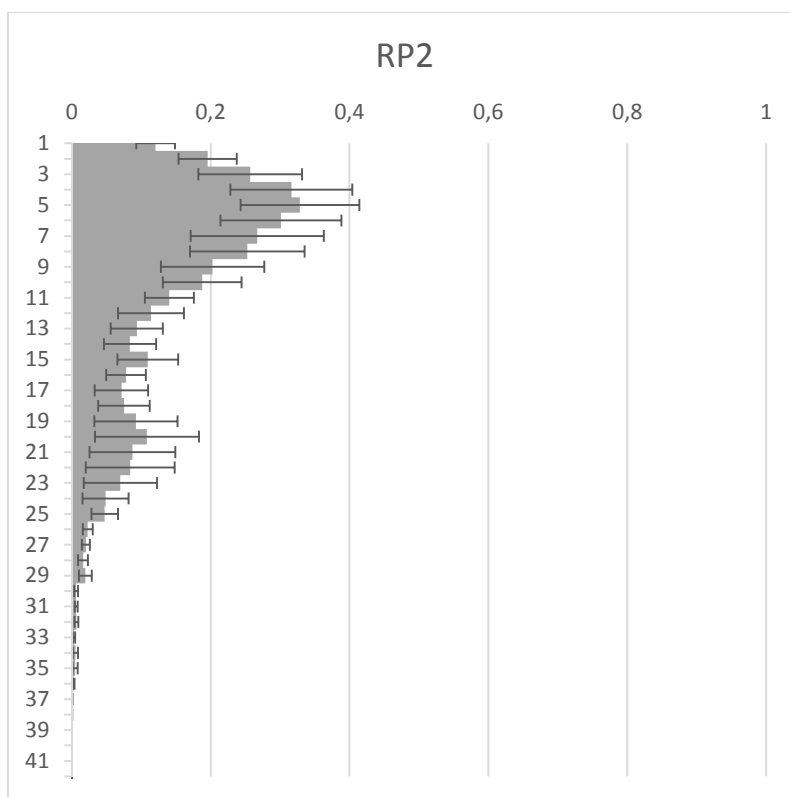


Figura 155. Resultados individuales del ensayo RP2.

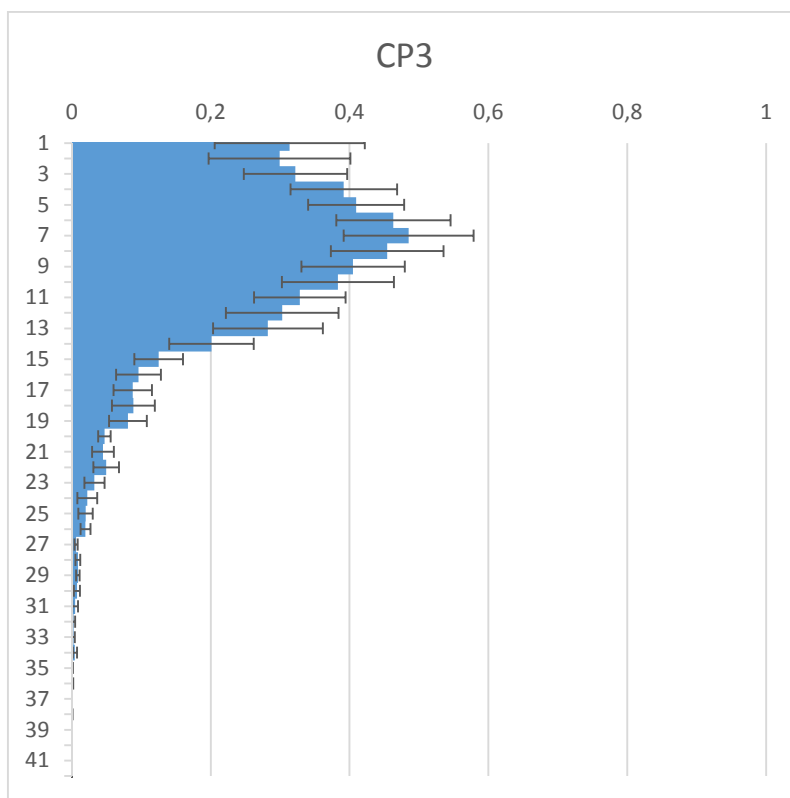


Figura 156. Resultados individuales del ensayo CP3.

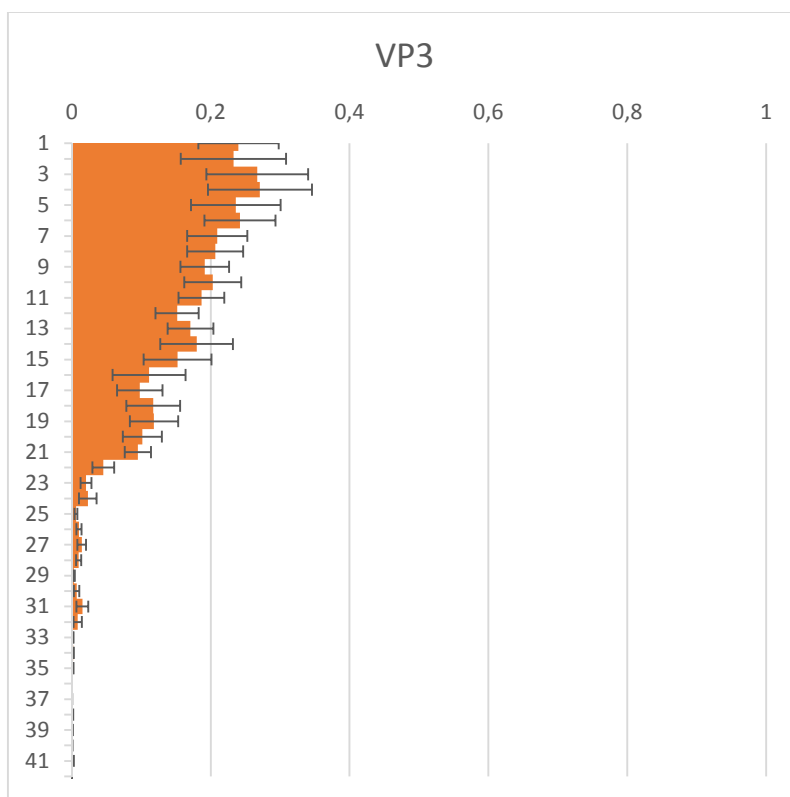


Figura 157. Resultados individuales del ensayo VP3.

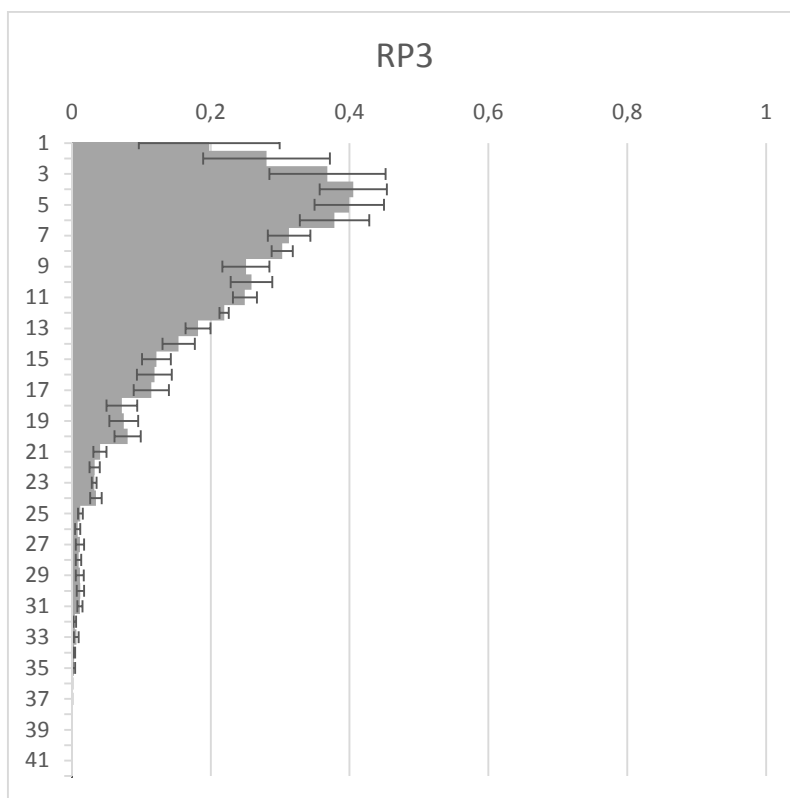


Figura 158. Resultados individuales del ensayo RP3.

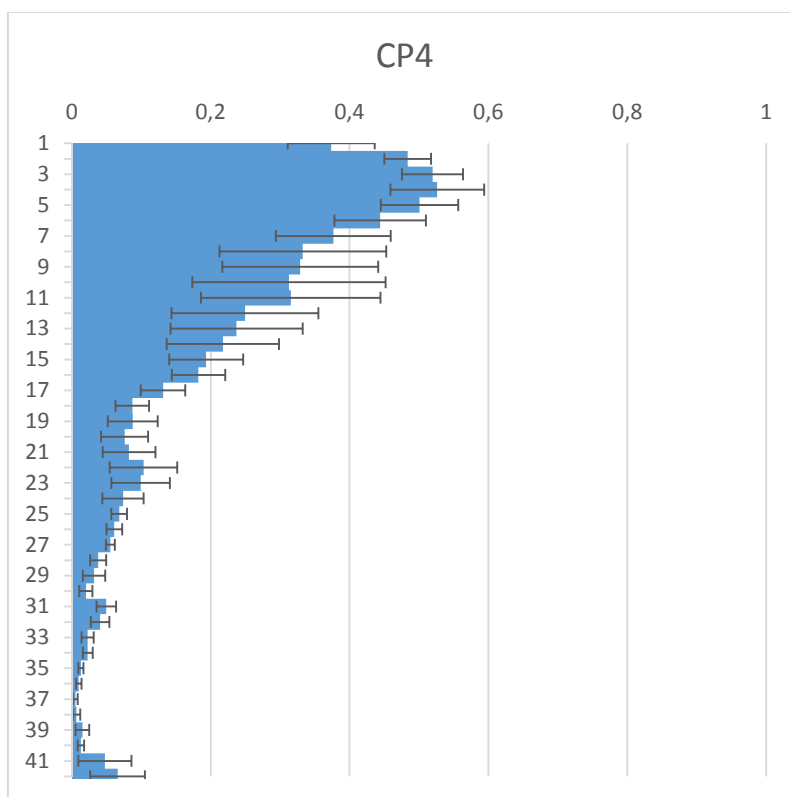


Figura 159. Resultados individuales del ensayo CP4.

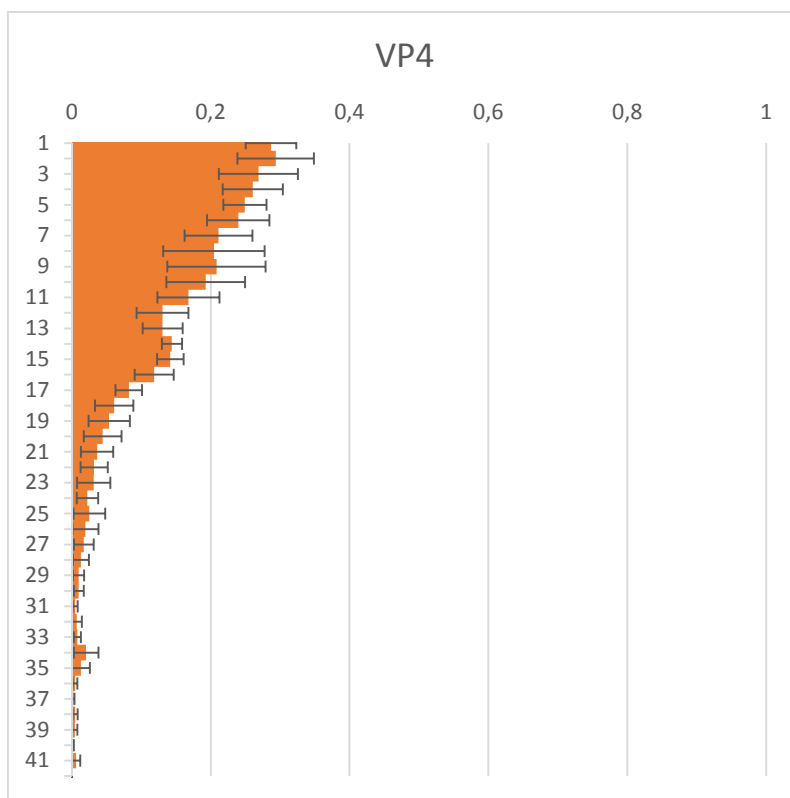


Figura 160. Resultados individuales del ensayo VP4.

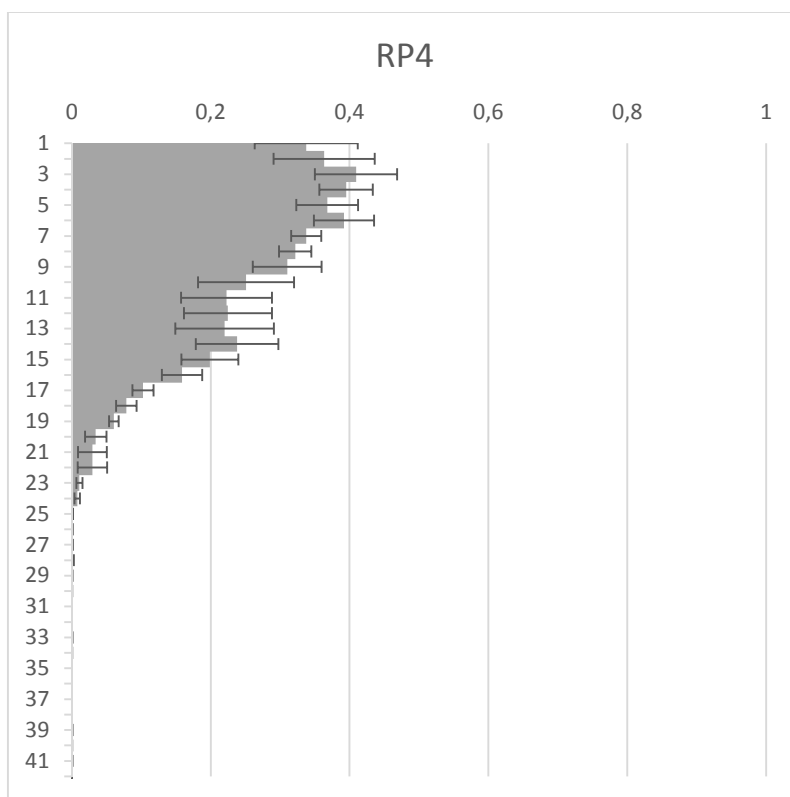


Figura 161. Resultados individuales del ensayo RP4.

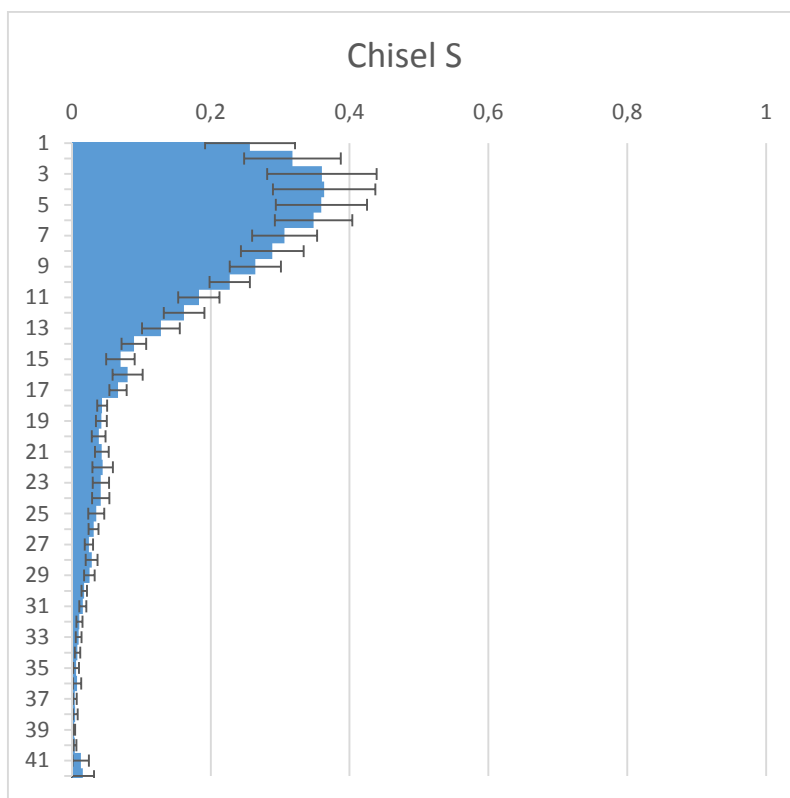


Figura 162. Resultados individuales de la zona seca del chisel.

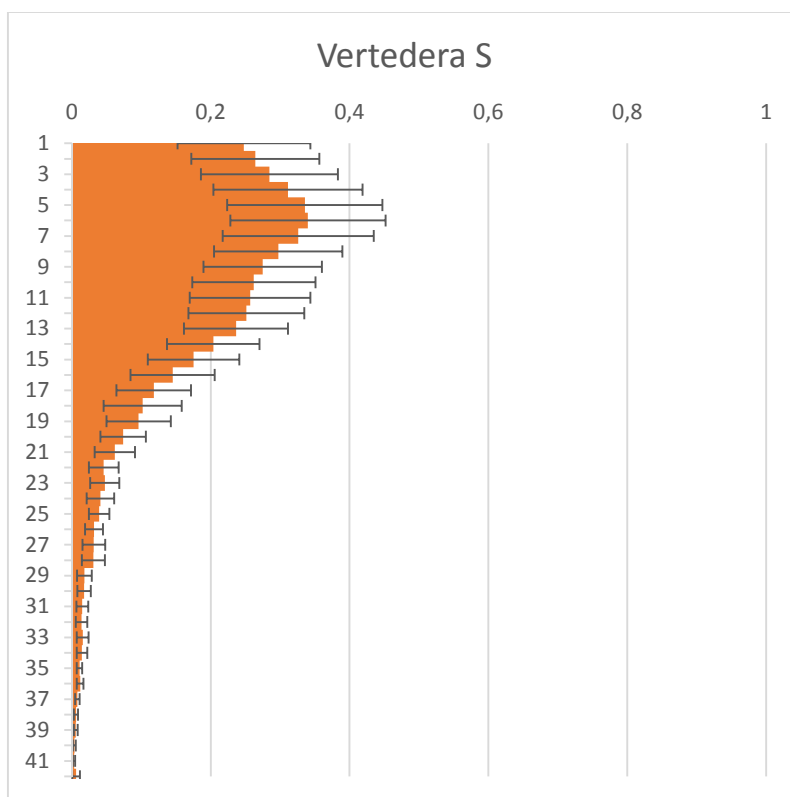


Figura 163. Resultados individuales de la zona seca de la vertedera.

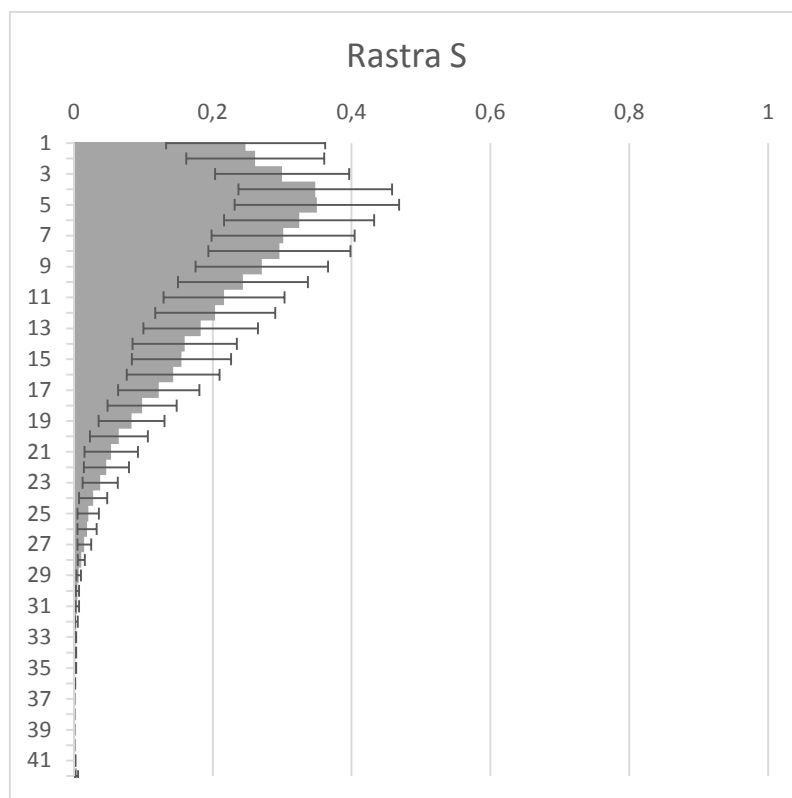


Figura 164. Resultados individuales de la zona seca de la rastra.

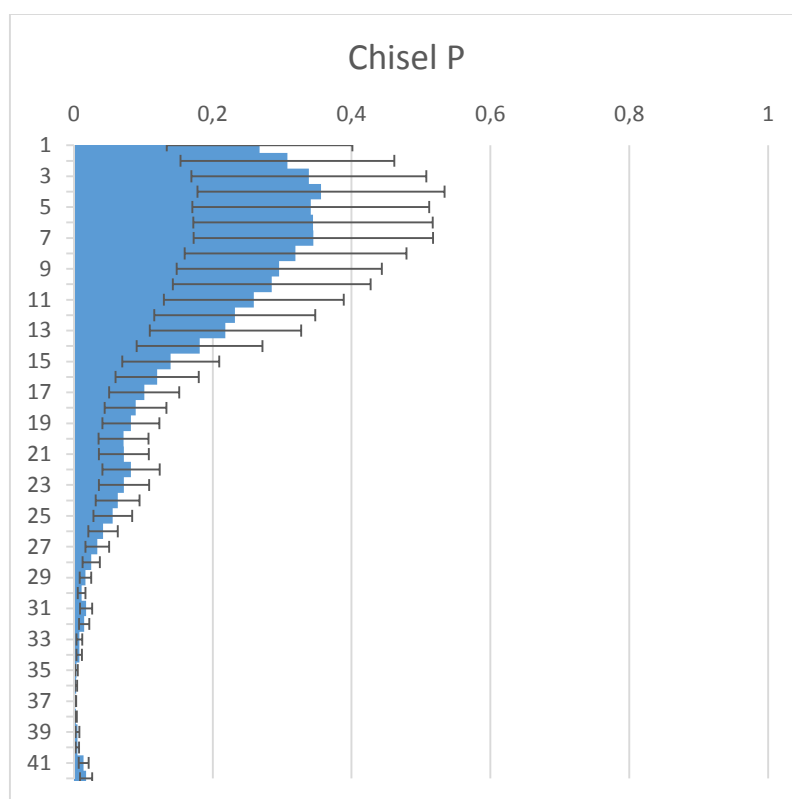


Figura 165. Resultados individuales de la zona húmeda del chisel.

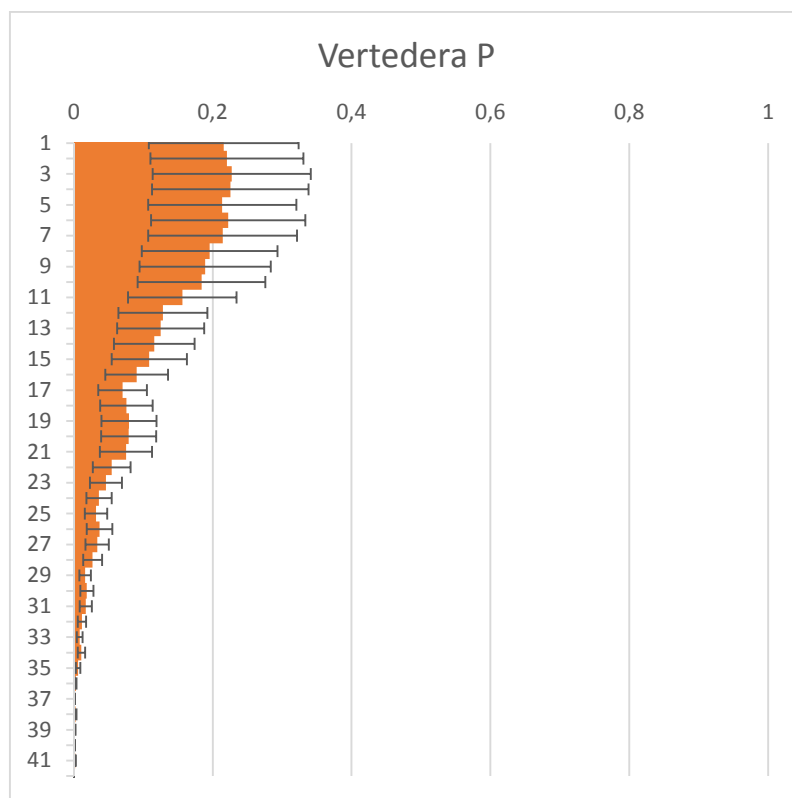


Figura 166. Resultados individuales de la zona húmeda de la vertedera.

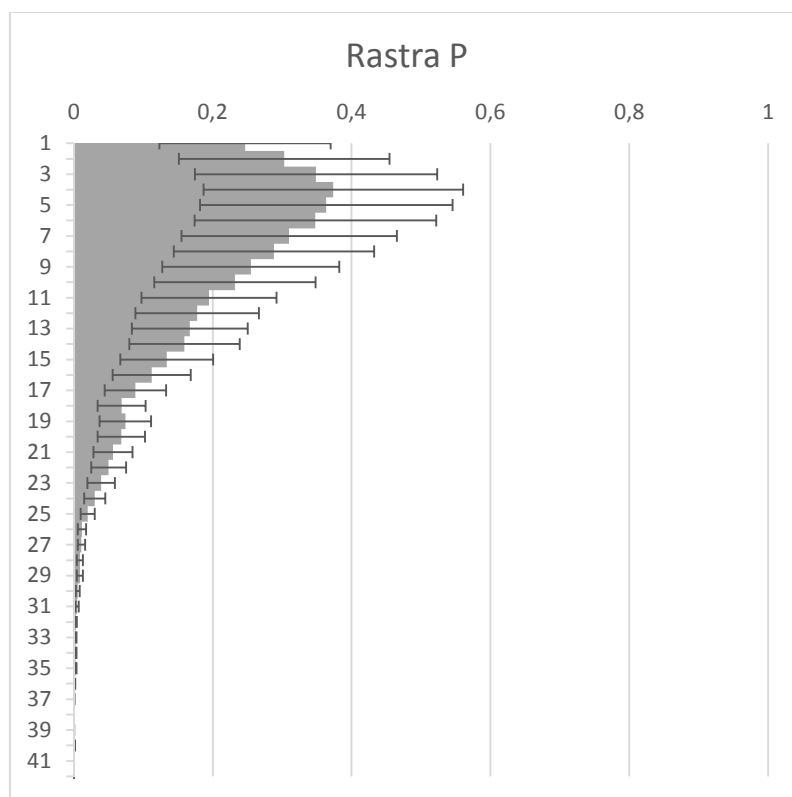


Figura 167. Resultados individuales de la zona húmeda de la rastra.

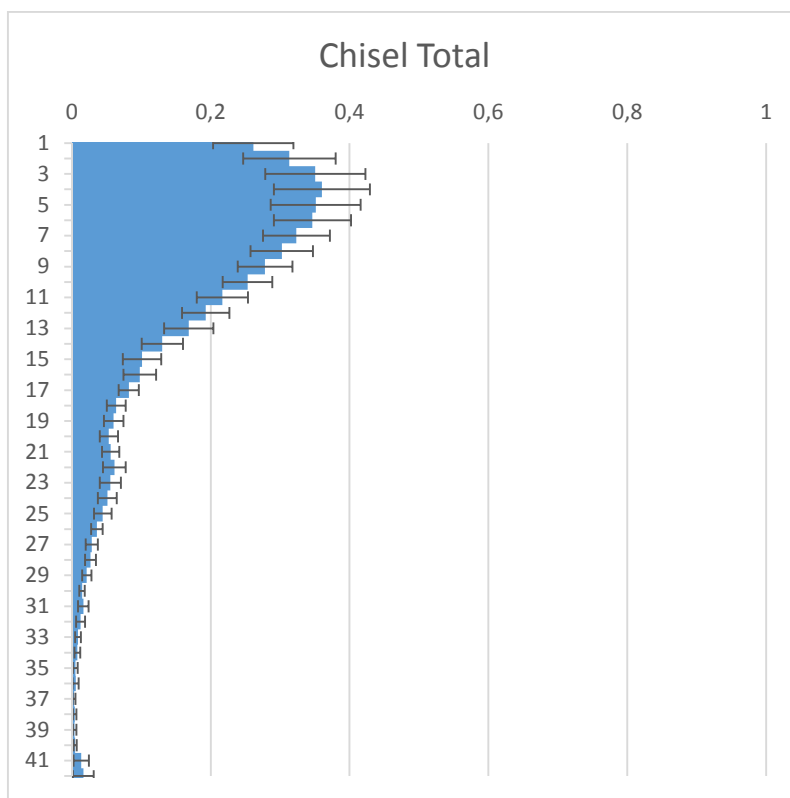


Figura 168. Resultados individuales del chisel.

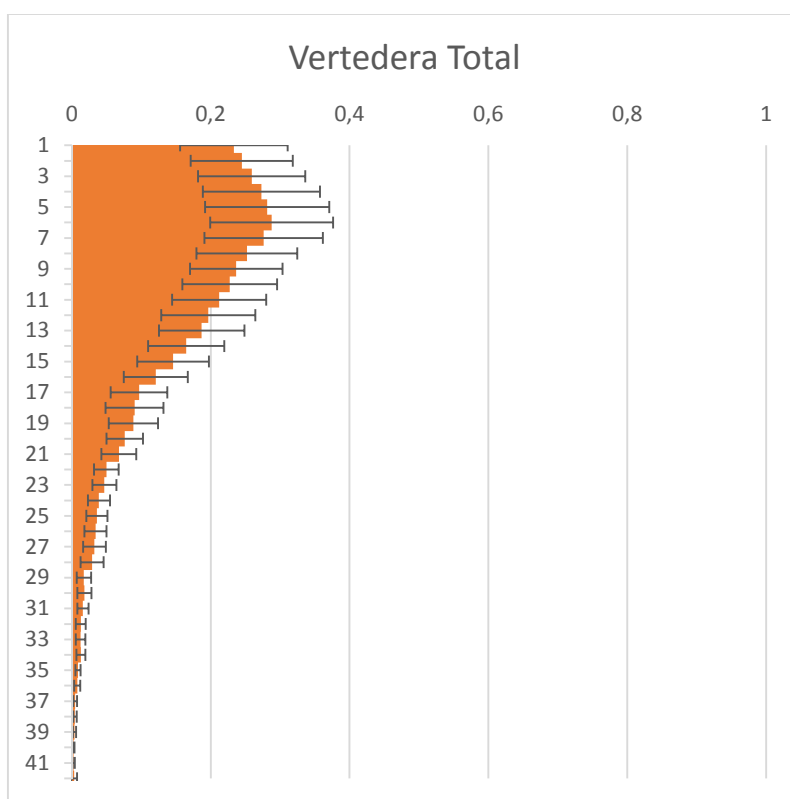


Figura 169. Resultados individuales de la vertedera.

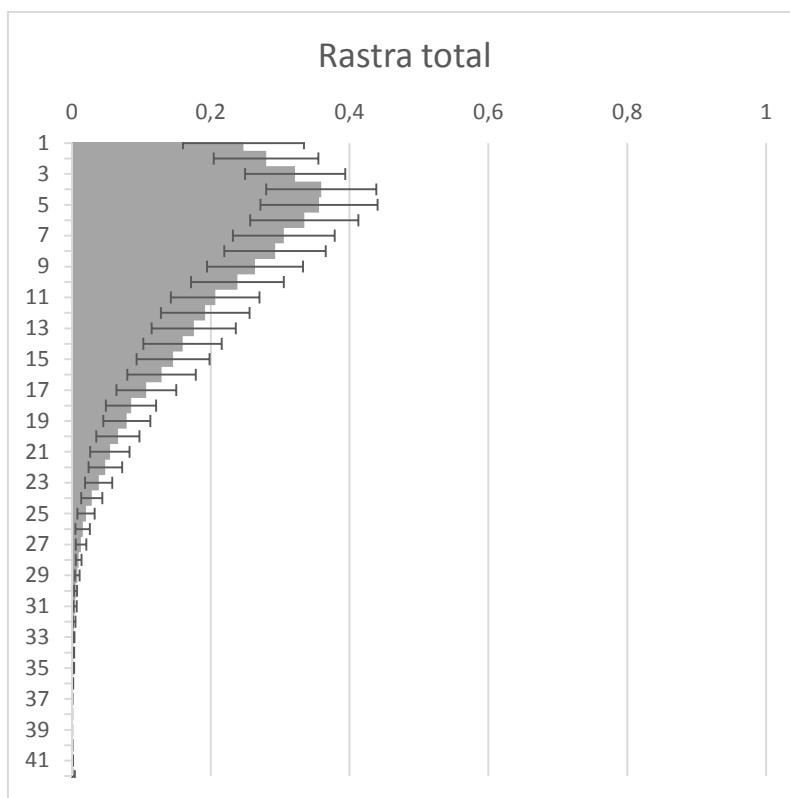


Figura 170. Resultados individuales de la rastra.

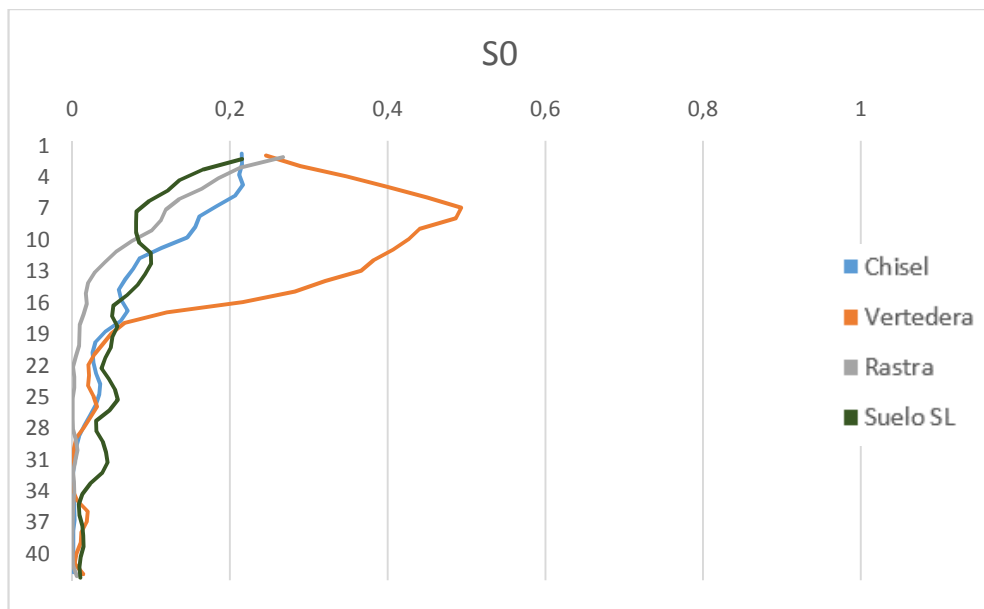


Figura 171. Resultados del ensayo S0.

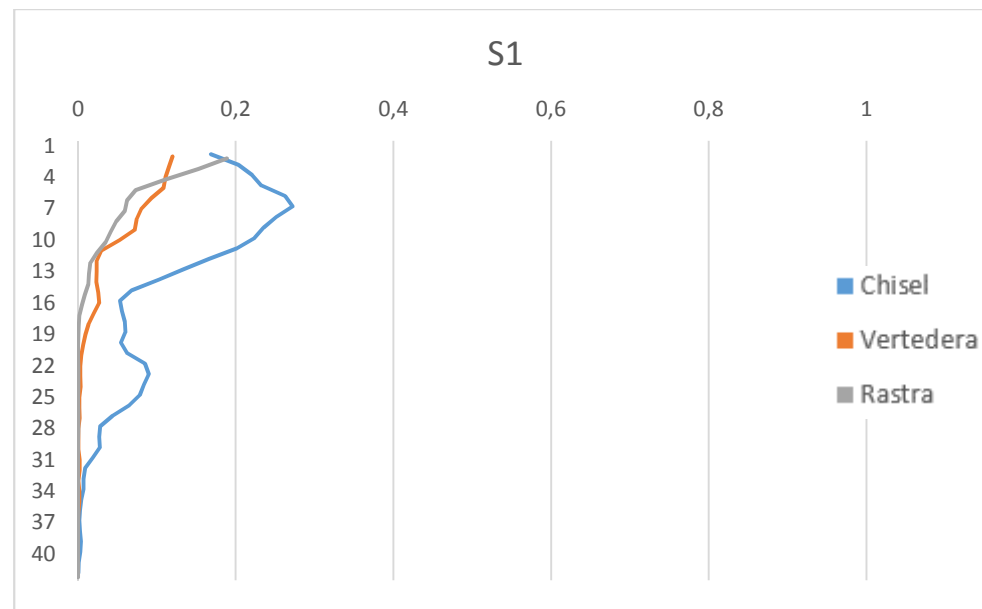


Figura 172. Resultados del ensayo S1.

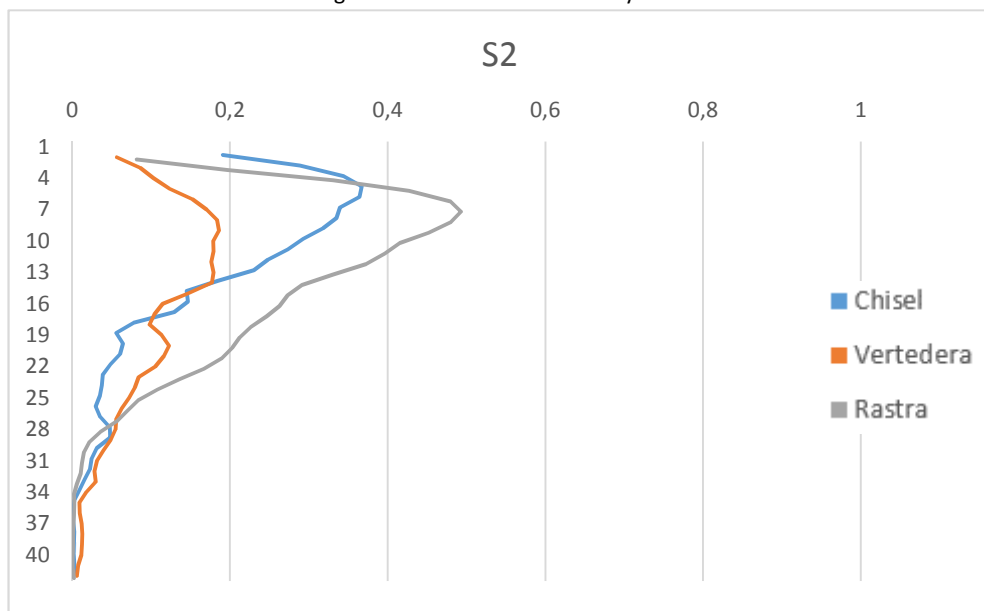


Figura 173. Resultados del ensayo S2.

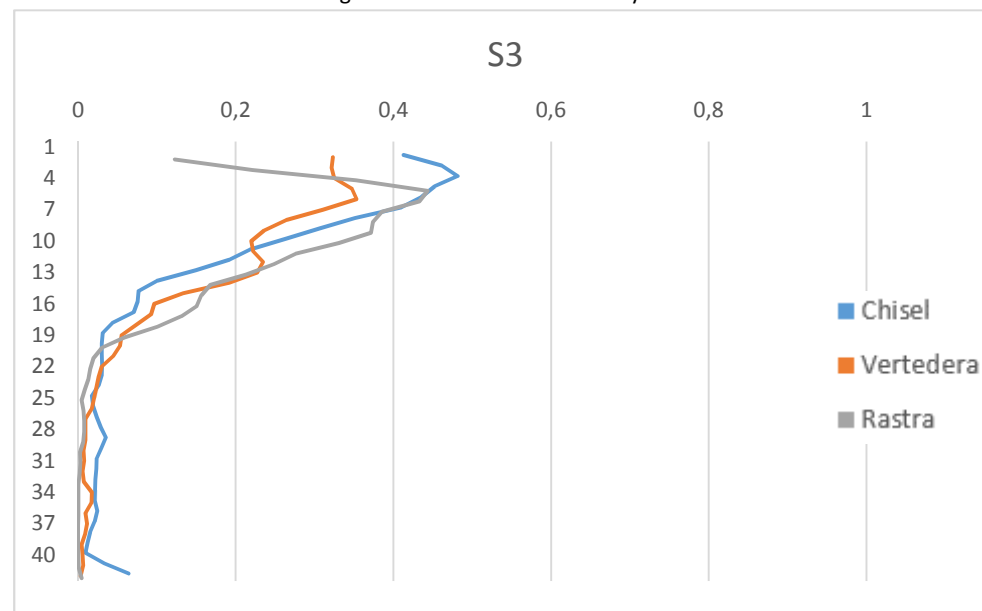


Figura 174. Resultados del ensayo S3.

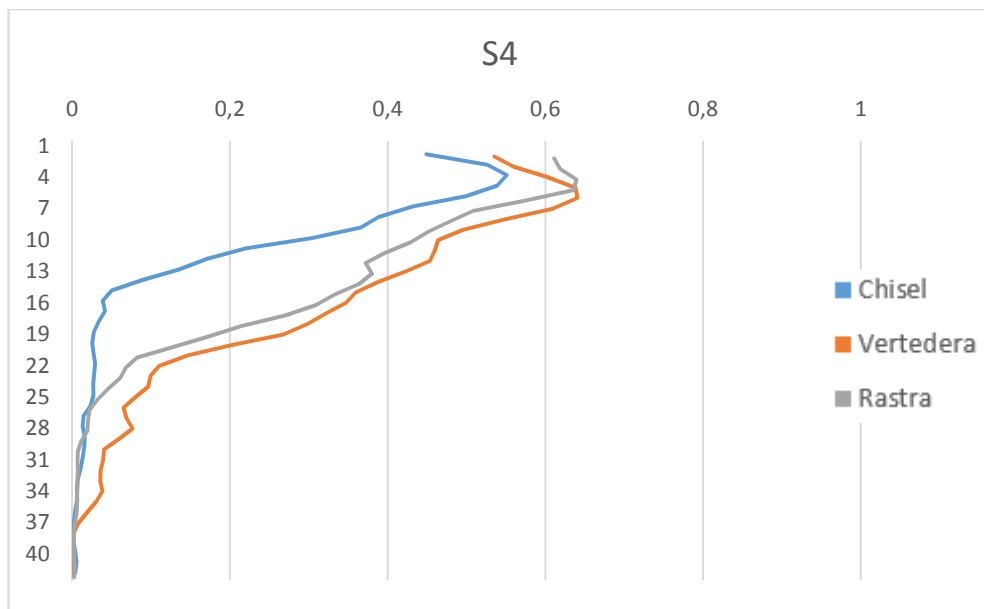


Figura 175. Resultados del ensayo S4.

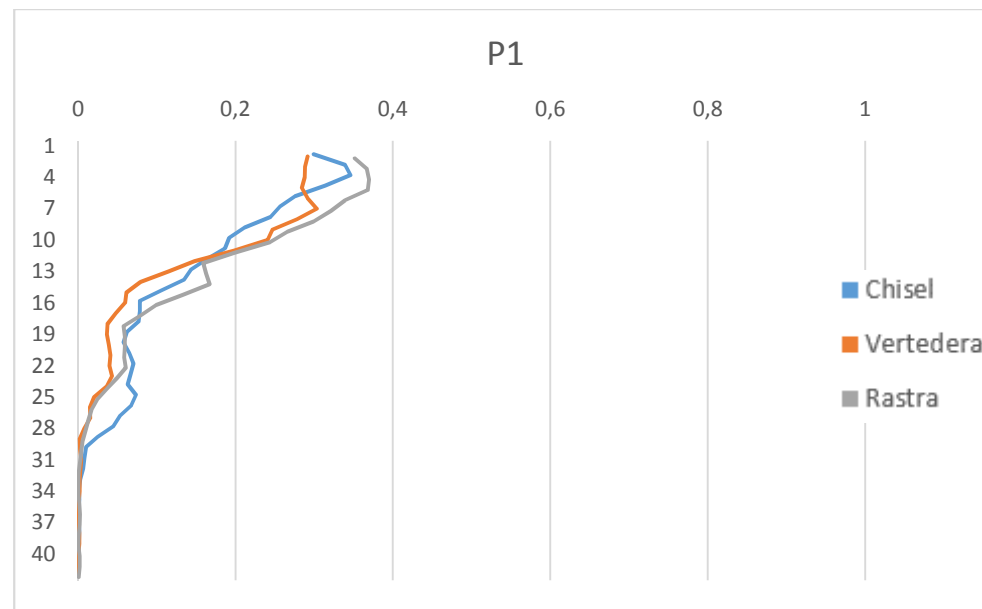


Figura 176. Resultados del ensayo P1.

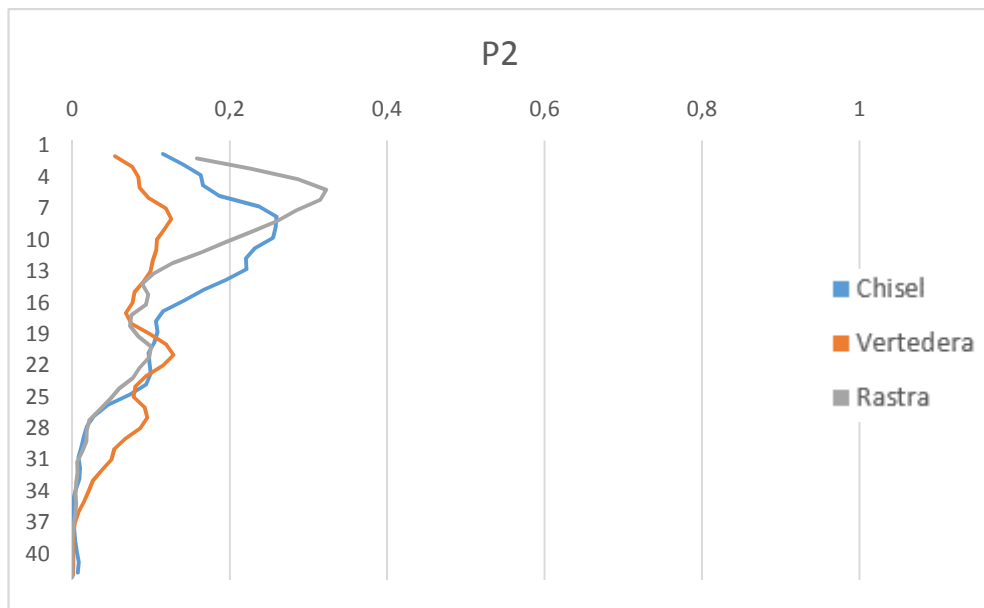


Figura 177. Resultados del ensayo S4.

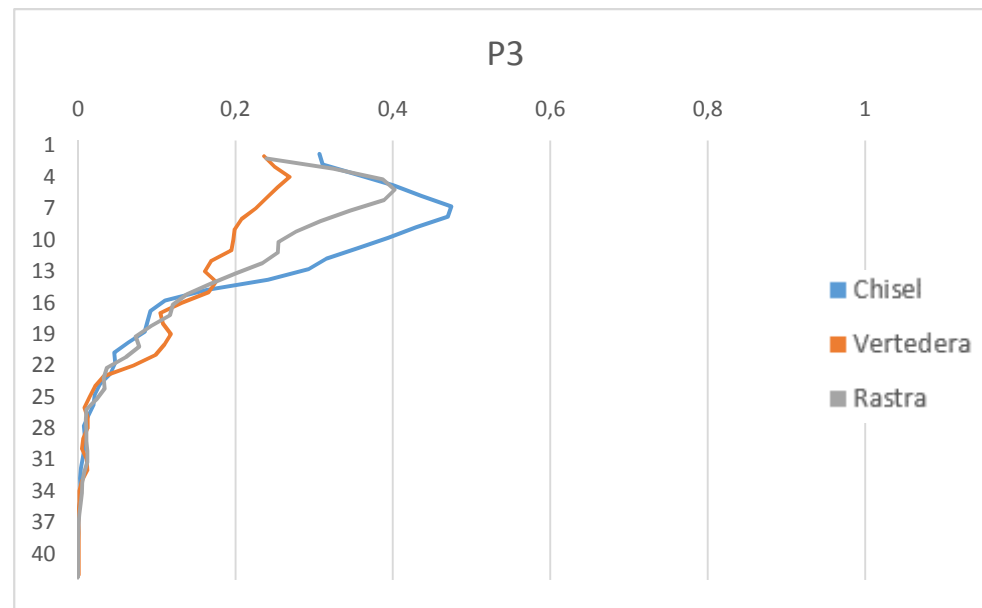


Figura 178. Resultados del ensayo P1.

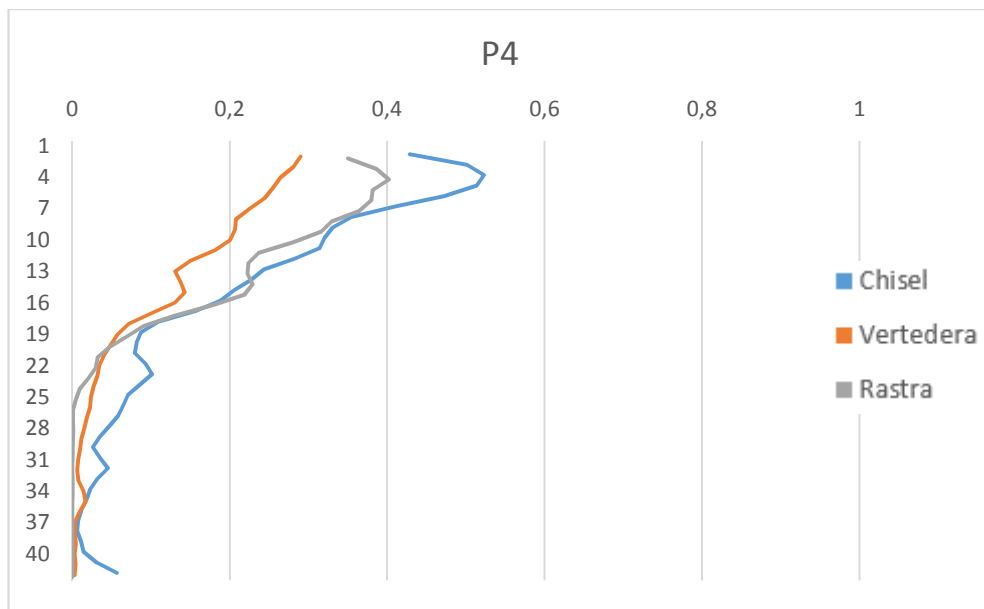


Figura 179. Resultados del ensayo P4.

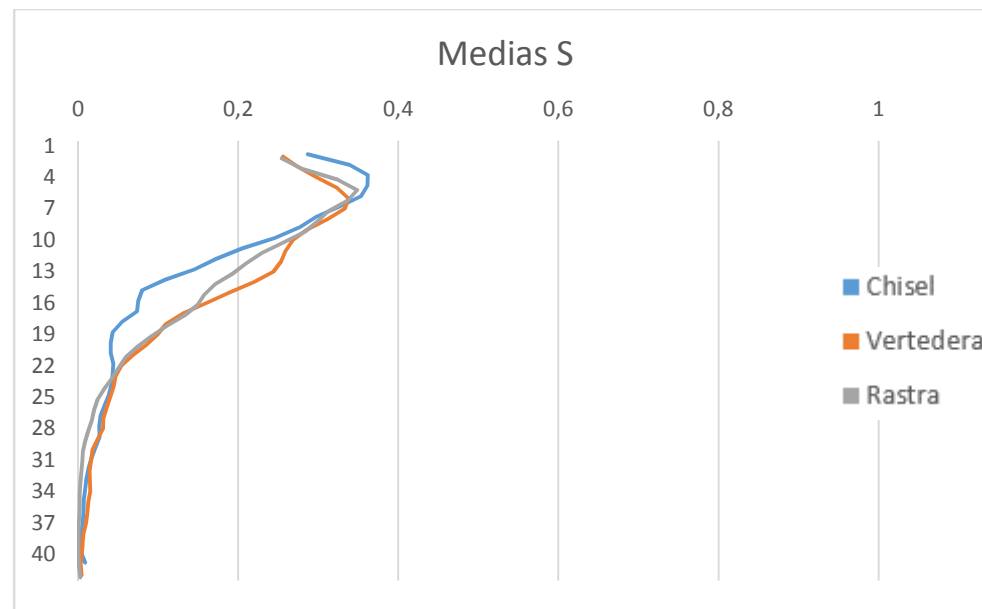


Figura 180. Resultados medios de la zona seca (S).

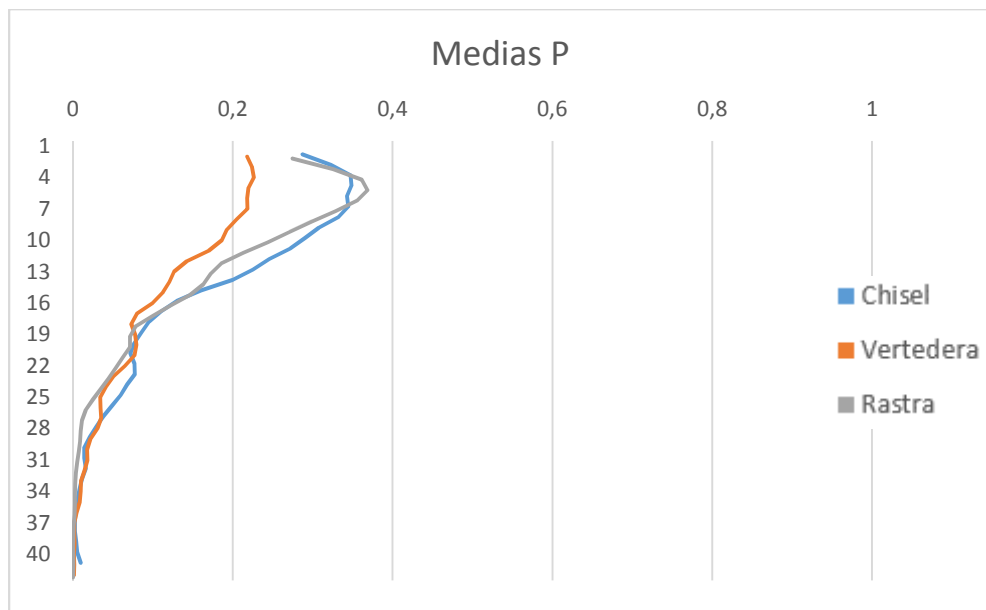


Figura 181. Resultados medios de la zona húmeda (P).

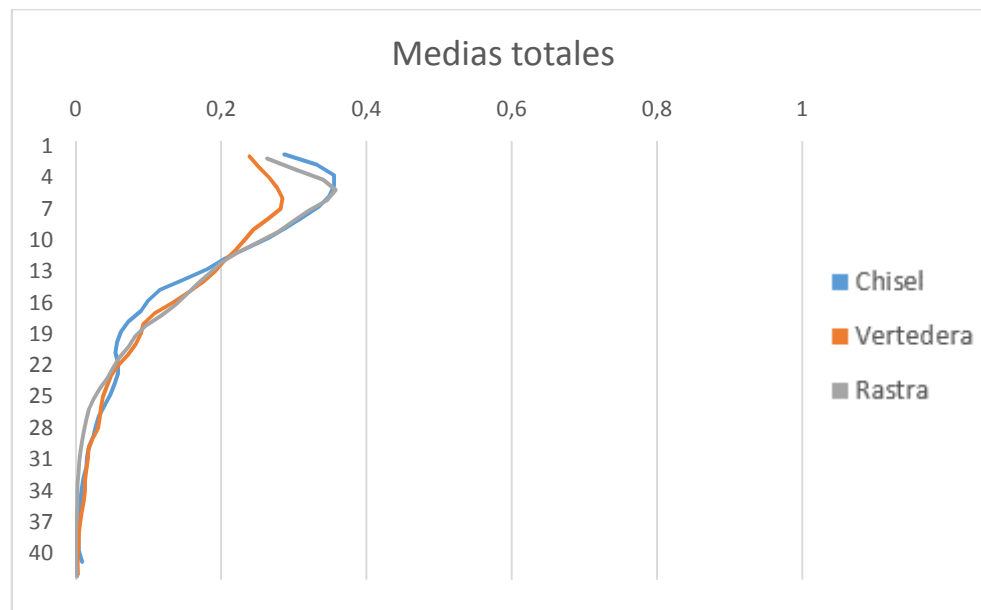


Figura 182. Resultados medios tales.

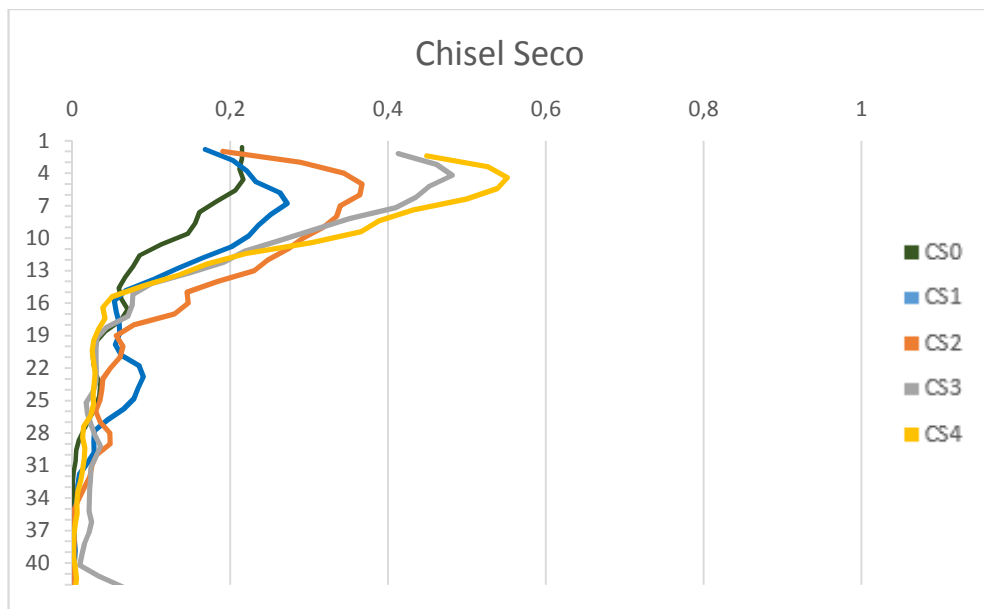


Figura 183. Resultados evolutivos del chisel en seco.

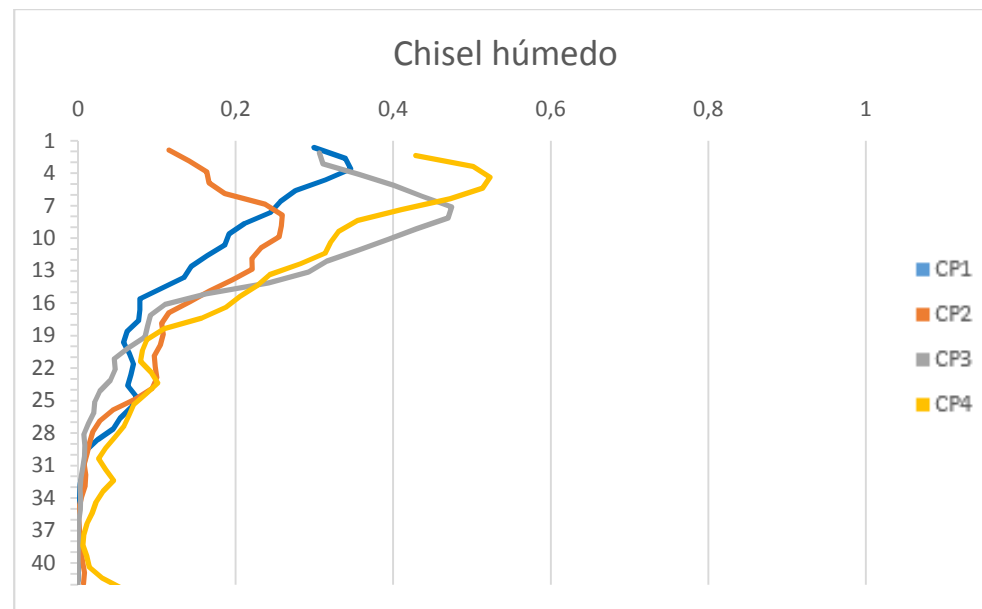


Figura 184. Resultados evolutivos del chisel en húmedo.

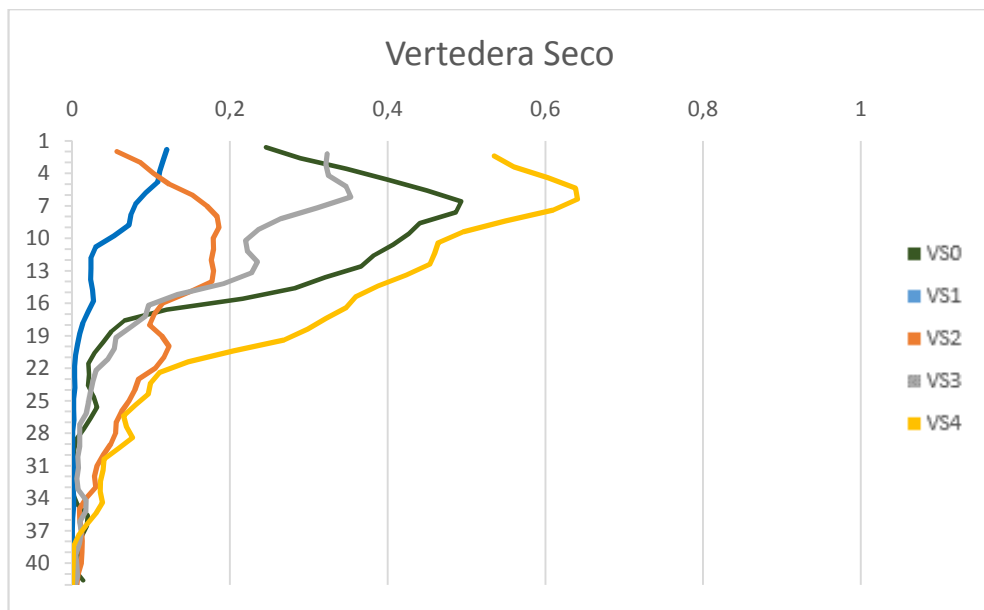


Figura 185. Resultados evolutivos de la vertedera en seco.

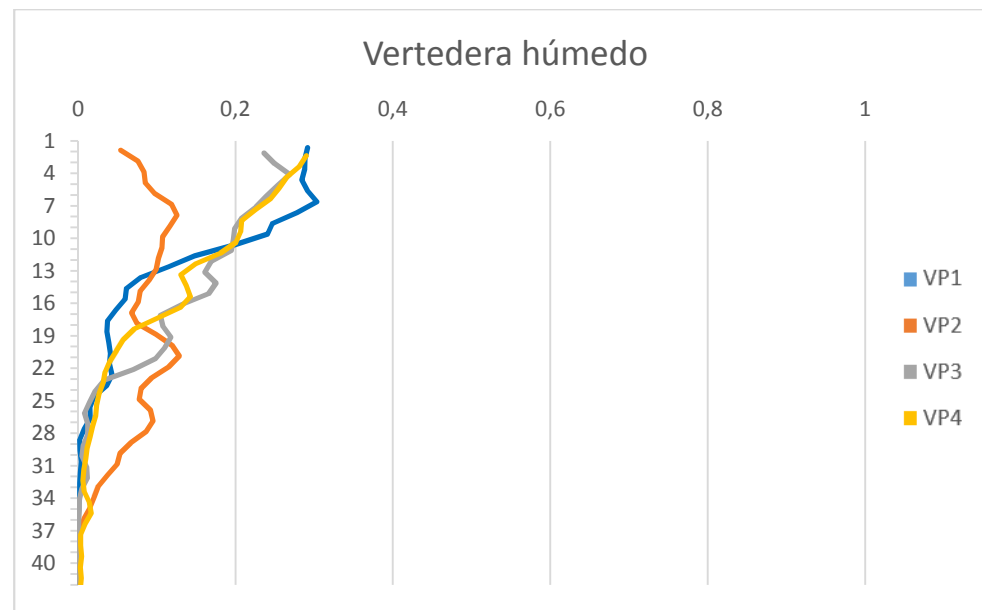


Figura 186. Resultados evolutivos de la vertedera en húmedo.

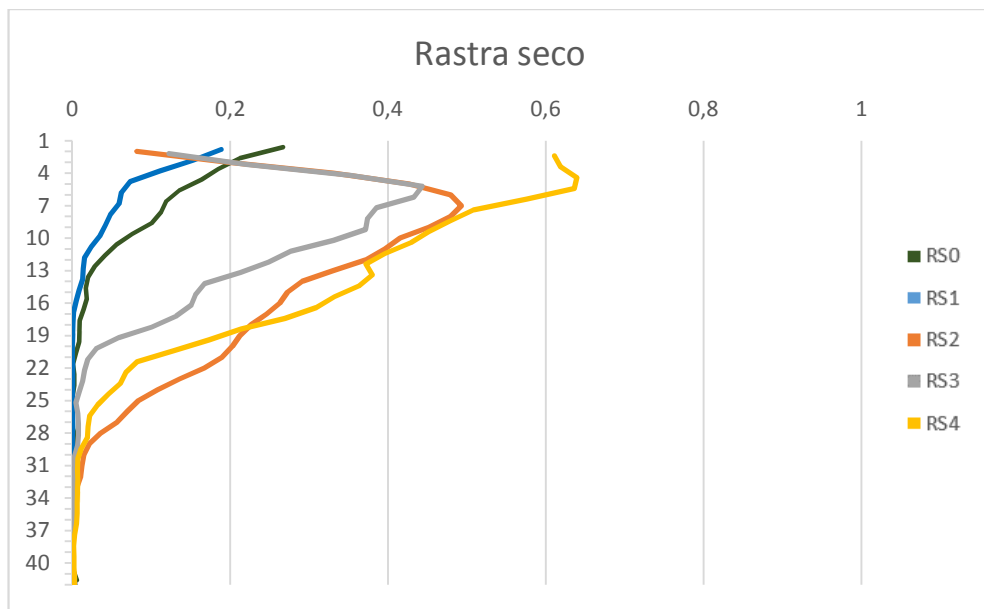


Figura 187. Resultados evolutivos de la rastra en seco.

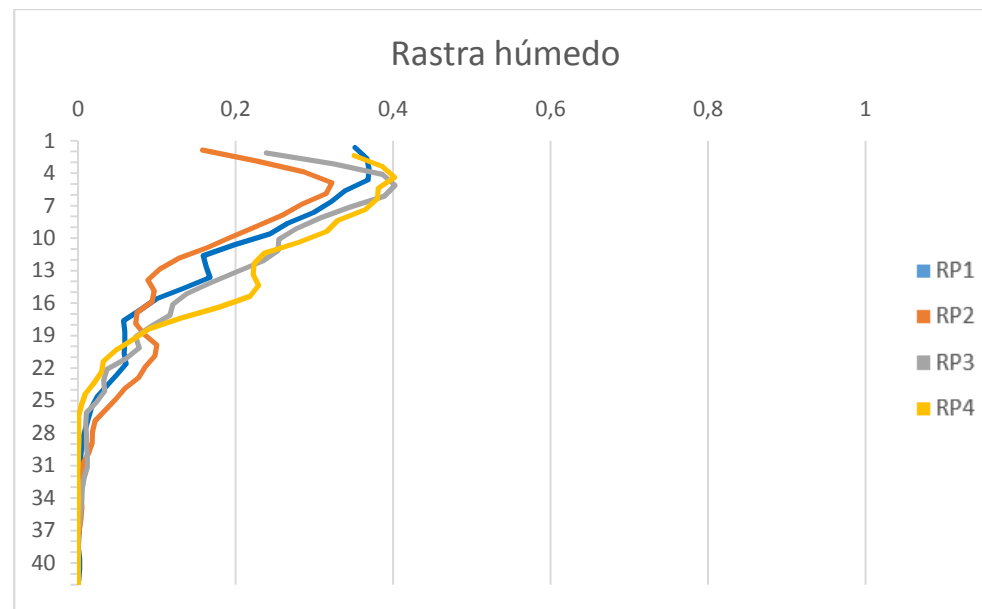


Figura 188. Resultados evolutivos de la rastra en húmedo.

Universidad Pública de Navarra
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS AGRONOMOS

Nafarroako Unibertsitate Publikoa
NEKAZARITZAKO INGENIARIEN
GOI MAILAKO ESKOLA TEKNIKO



Anexo 3

Aplicación de importación de tablas

Presentado por:

IBAN ITURRIA AGUINAGA

MASTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA AGRONÓMICA

ANEXO 3: APLICACIÓN DE IMPORTACIÓN DE TABLAS

El objetivo de esta aplicación es reducir el trabajo que supondría obtener las estadísticas de las imágenes manualmente. Para ello se ha programado en VBA (Visual Basic) en Microsoft Excel. La aplicación tiene la siguiente apariencia frente al usuario (figura 189):

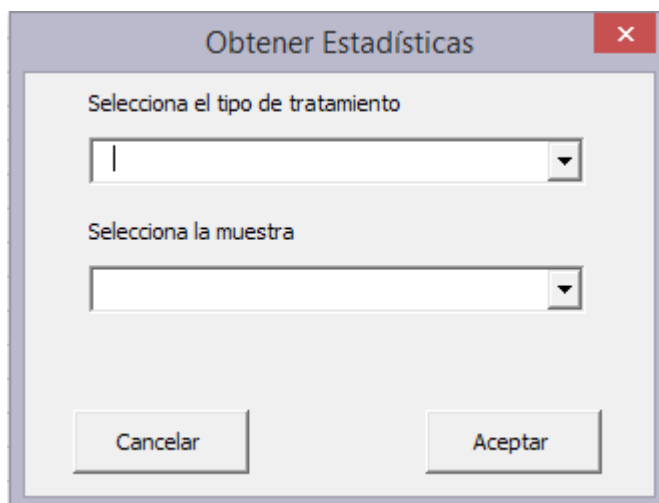


Figura 189. Apariencia de la aplicación frente al usuario.

Como se ve en la imagen, en el primer espacio o combo box, se especifica el tipo de tratamiento, haciendo clic en la flecha de la derecha se despliegan las opciones, que en este caso son Chisel, Vertedera, Rastra, o Suelo sin laborear. Una vez se ha seleccionado el tipo de tratamiento del que se quieren importar las tablas, se selecciona la muestra concreta que se quiere importar, o todas en el caso de que se quieran importar todas las tablas de ese tratamiento. La nomenclatura utilizada para guardar cada una de las imágenes es la clave para el funcionamiento del programa, debido que en Excel se ha introducido una pestaña en la cual se muestran los nombres de las tablas a importar y son los nombres que utiliza para luego hacer la búsqueda en el directorio de origen (figura 190).

	A	B	C	D	E	F
1	Nombre dbf					
2	Chisel	Vertedera	Rastra	SueloSinLaborear	Calcular estadísticas	
3	CS0_1	VS0_1	RS0_1	SD0_1		
4	CS0_2	VS0_2	RS0_2	SD0_2		
5	CS0_3	VS0_3	RS0_3	SD0_3		
6	CS0_4	VS0_4	RS0_4	SD0_4		
7	CS0_5	VS0_5	RS0_5	SD0_5		
8	CS0_6	VS0_6	RS0_6	SD0_6		
9	CS1_1	VS1_1	RS1_1	SD0_7		
10	CS1_2	VS1_2	RS1_2	SD0_8		
11	CS1_3	VS1_3	RS1_3			
12	CS1_4	VS1_4	RS1_4			
13	CS2_1	VS2_1	RS2_1			
14	CS2_2	VS2_2	RS2_2			
15	CS2_3	VS2_3	RS2_3			
16	CS2_4	VS2_4	RS2_4			
17	CS3_1	VS3_1	RS3_1			
18	CS3_2	VS3_2	RS3_2			
19	CS3_3	VS3_3	RS3_3			
20	CS3_4	VS3_4	RS3_4			
21	CS4_1	VS4_1	RS4_1			
22	CS4_2	VS4_2	RS4_2			

Figura 190. Captura de pantalla de la tabla Excel con los nombres de las tablas.

El botón que se muestra en la imagen anterior (Calcular estadísticas) es el que ejecuta el programa de importación de tablas. Una vez se clic en el botón, se muestra la ventana que se muestra en la figura 190.

El programa puede diferenciarse en dos partes diferentes, la primera corresponde a la ventana emergente (User form) que permite al usuario escoger los parámetros de las tablas que quiere importar, y la segunda parte corresponde a los módulos de subrutinas que realizan las operaciones de importación y creación de estadísticas.

1. User Form

Lo primero que hace el programa al iniciarse es vaciar los dos combo box (por si había algo cargado) y cargar los nombres de los tratamientos en el primer combo box. Para ello utiliza el siguiente código (figura 191):

```
Private Sub UserForm_initialize()

    ComboTratamiento.Clear
    ComboNombreLibro.Clear

    With ComboTratamiento
        Hoja1.Select
        .AddItem Range("A2").Value
        .AddItem Range("B2").Value
        .AddItem Range("C2").Value
        .AddItem Range("D2").Value
    End With

End Sub
```

Figura 191. Código de inicio de programa.

A partir de este momento, el programa espera hasta que el usuario seleccione uno de los tratamientos introducidos en el primer combo box, (ComboTratamiento en el código). Una vez que se selecciona uno de los tratamientos, carga la opción "Todos", seguido de todas las imágenes del tratamiento escogido en el segundo combo box (ComboNombreLibro en el código). Para ello se utiliza el siguiente código (figura 192):

```
Private Sub ComboTratamiento_Change()
    ComboNombreLibro.Clear

    Dim Celda As String
    Range("A2", "D2").Find(ComboTratamiento).Select
    Celda = ActiveCell.Address

    With ComboNombreLibro
        .AddItem "Todos"
        While Not IsEmpty(ActiveCell)
            Celda = ActiveCell.Offset(1, 0).Address
            Range(Celda).Select
            .AddItem ActiveCell.Value
        Wend
    End With

End Sub
```

Figura 192. Código de introducción de los nombres de las imágenes en el segundo combo box.

Una vez que se selecciona la muestra, el programa no hace nada hasta darle al botón de aceptar. Una vez accionado el botón, el programa tiene dos variantes; el primero si se ha escogido una muestra concreta, y el segundo si se han escogido todas. El código introducido en el botón aceptar es el siguiente (figura 193):

```
Private Sub Aceptar_Click()  
If ComboNombreLibro.Value = "Todos" Then  
    Call EstadisticasFilasTodas  
  
Else: Call EstadisticaFilas  
End If  
  
End  
  
End Sub
```

Figura 193. Código del botón aceptar.

Observando la imagen anterior se puede ver que lo que el botón realmente hace es llamar a la subrutina "EstadisticasFilasTodas" si se ha seleccionado la opción "Todos", y llamar a "EstadisticasFilas" para cualquier otra opción. En este momento el usuario no puede manipular nada más hasta que el programa termina de ejecutarse, dando paso a las subrutinas.

2. Subrutinas

El programa tiene 4 subrutinas, dos de ellas son las anteriormente mencionadas "EstadisticasFilasTodas" y "EstadisticasFilas", y las otras dos son "ImportarTablas" y "CalculoEstadisticas". Las primeras dos configuran las variables de tal forma que al introducirlas en las siguientes las siguientes, calculen las estadísticas de las opciones seleccionadas, es decir se ejecuta o una o la otra pero nunca las dos.

- Subrutina 1 "Estadísticas Filas":

Si se ejecuta esta subrutina quiere decir que se ha escogido una tabla en concreto para importar las estadísticas. Esta subrutina coge el nombre de la tabla que se ha especificado en la ventana y la introduce en la variable "NombreLibro" llama a la subrutina "ImportarTabla" y posteriormente a la "CalculoEstadísticas" y finalmente cierra el archivo que abre una de estas subrutinas.

El código utilizado para esta subrutina es el siguiente (figura 194):

```
Sub EstadisticaFilas()  
Set LibroPegado = ActiveWorkbook  
NombreLibro = UserForm1.ComboNombreLibro.Value  
Call ImportarTabla  
Call CalculoEstadisticas  
Workbooks(NombreLibro + ".dbf").Close  
End Sub
```

Figura 194. Código de la subrutina "EstadisticasFilas".

- Subrutina 2 "EstadisticasFilasTodas":

Esta subrutina solo se ejecuta si se ha escogido la opción de "Todos" en el segundo combo box. El funcionamiento es muy similar al anterior, con la diferencia de que tiene que ir importando todas las

tablas del tratamiento seleccionado de forma seguida. Es decir, una vez que importa una tabla, salta a la siguiente del mismo tratamiento, y así sucesivamente hasta que se importan todas.

Para ello son necesarias ciertas variables para el correcto funcionamiento del programa, que son las siguientes:

ColumnaNombreLibro: Es una variable que guarda la columna en la que se encuentra el tratamiento seleccionado. Ejemplo: si se ha escogido Chisel el valor de esta variable será 1, mientras que si se ha escogido vertedera el valor de esta variable será 2.

FilaNombreLibro: Esta variable guarda el número de fila en la que se encuentra el nombre de la tabla que se está importando. Una vez que se termina de importar una tabla, se le suma 1 a esta variable de tal forma que selecciona la fila siguiente. Teniendo en cuenta que los nombres de las tablas empiezan en la tercera fila, esta variable empieza con un valor de 3.

NombreLibro: Esta variable guarda el nombre de la tabla que se quiere importar. Este nombre se obtiene de la celda especificada por el número de fila definido por la variable "FilaNombreLibro" y el número de columna especificado por "ColumnaNombreLibro".

LibroPegado: Guarda el nombre del archivo en el que se quieren introducir los datos de las estadísticas. Se usa en las siguientes subrutinas.

El funcionamiento de esta subrutina es sencillo, consta de un bucle que comprueba si la celda definida por "FilaNombreLibro" y "ColumnaNombreLibro" está vacía. Si no lo está realiza lo que hay dentro del bucle, llamando a las subrutinas "ImportarTabla" y "CalculoEstadisticas", y posteriormente le suma un valor a "FilaNombreLibro", y guarda en "NombreLibro" el nombre que se encuentra en la siguiente fila. Cierra el archivo que se abre en "ImportarTabla" y vuelve a hacer la comprobación de si la celda de la nueva fila está vacía. Esto sigue así hasta que termina de recorrer todos los nombres de las tablas del tratamiento y llega a una celda vacía, deteniendo el programa. El código empleado para realizar estas acciones es el siguiente (figura 195):

```
Sub EstadisticasFilasTodas()
Application.ScreenUpdating = False
ColumnaNombreLibro = ActiveCell.Column
FilaNombreLibro = 3
NombreLibro = Cells(FilaNombreLibro, ColumnaNombreLibro).Value
Set LibroPegado = ActiveWorkbook
While Not IsEmpty(Cells(FilaNombreLibro, ColumnaNombreLibro))

    Call ImportarTabla
    Call CalculoEstadisticas
    FilaNombreLibro = FilaNombreLibro + 1
    Workbooks(NombreLibro + ".dbf").Close
    NombreLibro = Cells(FilaNombreLibro, ColumnaNombreLibro).Value
Wend

Application.ScreenUpdating = True
End Sub
```

Figura 195. Código de la subrutina "EstadisticasFilasTodas".

En el código anterior se muestran dos órdenes especiales, “Application.ScreenUpdating = False” y “Application.ScreenUpdating = True”, la primera hace que mientras que la aplicación se esté ejecutando la pantalla no se actualice. Esto es importante debido a que las siguientes subrutinas cambian de un archivo a otro constantemente y el actualizar la pantalla además de ralentizar las operaciones es desagradable para la vista del usuario. Una vez terminada la ejecución del programa, vuelve a instaurar la actualización de pantalla con “Application.ScreenUpdating = True”.

- Subrutina 3 “ImportarTabla”:

Las variables que utiliza esta subrutina vienen definidas en la subrutina 1 o en la subrutina 2, dependiendo de si se ha escogido una tabla en concreto, o todas las tablas para importar.

Tal y como indica el nombre de la subrutina, su función es la de importar las tablas de atributos de las cuadrículas realizadas con QGIS, en ellas están las estadísticas que interesa obtener. Para ello primero activa el libro donde se introducirán los resultados, y se selecciona la ubicación donde están guardados los archivos vectoriales (las cuadrículas) con sus correspondientes tablas de atributos (E:\Uni\TFM\Fotos Master\Shp). Posteriormente abre el archivo con el nombre establecido en la variable “NombreLibro” con la extensión “.dbf”, que es la extensión de las tablas de atributos de las capas vectoriales y se termina la subrutina.

El código empleado para realizar esta subrutina es el siguiente (figura 196):

```
Sub ImportarTabla()

    Workbooks(LibroPegado.Name).Activate
    ChDir "E:\Uni\TFM\Fotos Master\Shp"
    Workbooks.Open Filename:="E:\Uni\TFM\Fotos Master\Shp\" + NombreLibro + ".dbf"

End Sub
```

Figura 196. Código de la subrutina “ImportarTabla”.

- Subrutina 4 “CalculoEstadisticas”:

Esta subrutina realiza el cálculo de las estadísticas que interesan, y las introduce en la hoja, fila y columna que corresponde.

Para ello se introducen nuevas variables necesarias para realizar su función. Estas variables son las siguientes:

HojaPegado: Esta variable guarda la hoja dentro del archivo de resultados, que corresponde al tratamiento escogido. Para facilitar esto, los nombres de las hojas corresponden con los nombres de los tratamientos de forma exacta, y por lo tanto la variable toma el valor que se introduce en la primera casilla del programa.

CellIni: Esta variable se utiliza para definir la fila dentro de la tabla de atributos de la imagen seleccionada, en la que se empieza el rango para tomar los datos para obtener las estadísticas. Una

vez que se obtienen las estadísticas dentro del rango definido por “CellIni” y “CellFin”, mediante un bucle, “CellIni” toma el siguiente valor a “CellFin” de tal forma que prepara el siguiente rango para obtener estadísticas.

CellFin: Esta variable se utiliza para definir la fila dentro de la tabla de atributos de la imagen seleccionada, en la que se termina el final del rango para tomar los datos para obtener las estadísticas. Como cada fila de cuadrículas está compuesta por 47 cuadrículas, esta variable se define como “CellIni”+46. Esta expresión está dentro de un bucle, por lo que cada vez que “CellIni” cambia al siguiente rango, también lo hace “CellFin” tomando el rango de las siguientes 47 cuadrículas.

Ffinal: Esta variable se utiliza para determinar la fila donde se introducirán las estadísticas obtenidas en la hoja de resultados. Tiene un valor predefinido de 2 para que empiece a introducirlas en la segunda fila, y mediante un bucle, cada vez que se introducen los datos pasa a la siguiente, creando una columna de datos.

ColumnaFinal: Esta variable se utiliza para determinar la columna donde se introducirán las estadísticas obtenidas den la hoja de resultados. Tiene un valor predefinido de 2 para que empiece a introducirlas en la segunda columna. Para que no se borren unos datos con otros, se comprueba mediante un bucle si esa columna está llena, si lo está se le suma uno a esta variable y se vuelve a comprobar hasta encontrar una columna vacía. En el momento en que se encuentra una vacía se introducen las estadísticas de Media, se le suma uno a esta variable, se introducen los datos de Desviacion, y se le resta uno a esta variable para colocarse en la columna original. De esta forma se van rellenando dos columnas de la misma fila a la vez, una con las medias y la otra con las desviaciones estándar.

Media: Esta variable guarda la media de las 47 celdas definidas por “CellIni” y “CellFin” de las tablas de atributos de las imágenes. Si se observa el código, la columna que se utiliza para calcular esta variable es la 8, esto es porque en la tabla de atributos las estadísticas de las medias se ubican en esta columna. Una vez introducida en la hoja de resultados, es superpuesta por la media de las siguientes 47. Esto se repite hasta acabar todas las celdas.

Desviacion: Esta variable es exactamente igual que la anterior pero con los datos de desviación estándar. Si se observa el código, la columna que se utiliza para calcular esta variable es la 10, esto es porque en la tabla de atributos las estadísticas de las desviaciones estándar se ubican en esta columna.

En esta subrutina hay dos bucles uno dentro del otro. El grande, se encarga de ir recorriendo la tabla de atributos de la imagen seleccionada de 47 celdas en 47 celdas mediante las variables anteriormente comentadas. Mientras que el bucle que hay dentro, se encarga de ir buscando la siguiente columna libre para introducir los datos sumándole 1 a la variable “ColumnaFinal”. Al final de la subrutina se ponen las cabeceras de los datos importados, siendo para el caso de las medias el nombre de la tabla, y para el caso de las desviaciones la palabra “Desv”. Estas cabeceras se colocan en la primera fila.

El código utilizado para realizar estas operaciones es el siguiente (figura 197):

```
Sub CalculoEstadisticas()
'Coge los datos de la hoja y copia las estadísticas en el libro de los macros

HojaPegado = UserForm1.ComboTratamiento.Value
Workbooks(NombreLibro + ".dbf").Activate

CellIni = 2 'Introduce la fila de la celda inicial
Cells(CellIni, 8).Select 'Selecciona la celda inicial para el promedio
Ffinal = 2 'Establece la fila de la celda donde se van a guardar los promedios
Columnafinal = 2 'Establece la columna de la celda donde se van a guardar los promedios
While Not IsEmpty(ActiveCell) 'Mientras la celda activa no esté vacía (no acabe la lista) sigue hacien

    CellFin = CellIni + 46 'Define CellFin como CellIni + 46 (Cada fila tiene 47 celdas)
    Media = Application.WorksheetFunction.Average(Range(Cells(CellIni, 8), Cells(CellFin, 8))) 'Guarda
    Desviacion = Application.WorksheetFunction.Average(Range(Cells(CellIni, 10), Cells(CellFin, 10)))
    CellIni = CellFin + 1 'Establece la fila de inicio en la siguiente a la del final (es decir cambia
    Cells(CellIni, 8).Select 'Selección la nueva celda inicial

    While Not IsEmpty(LibroPegado.Sheets(HojaPegado).Cells(Ffinal, Columnafinal))
        Columnafinal = Columnafinal + 1
    Wend

    LibroPegado.Sheets(HojaPegado).Cells(Ffinal, Columnafinal) = Media 'Pone el valor de Media en la c
    Columnafinal = Columnafinal + 1 'Le asigna la siguiente columna para introducir el valor de Desvia
    LibroPegado.Sheets(HojaPegado).Cells(Ffinal, Columnafinal) = Desviacion
    Columnafinal = Columnafinal - 1 'Vuelve a la columna original para seguir con las Media s
    Ffinal = Ffinal + 1 'Hace que seleccione la siguiente celda para guardar los promedios

Wend
LibroPegado.Sheets(HojaPegado).Cells(1, Columnafinal) = NombreLibro 'Pone el título del Libro en la Ho
LibroPegado.Sheets(HojaPegado).Cells(1, Columnafinal + 1) = "Desv" 'Pone el título Desv en el cabezal
End Sub
```

Figura 197. Código de la subrutina "CalculoEstadisticas".

Universidad Pública de Navarra
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS AGRONOMOS

Nafarroako Unibertsitate Publikoa
NEKAZARITZAKO INGENIARIEN
GOI MAILAKO ESKOLA TEKNIKO



Anexo 4

Datos de humedad de los ensayos

Presentado por:

IBAN ITURRIA AGUINAGA

MASTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA AGRONÓMICA

ANEXO 4: DATOS DE HUMEDAD DE LOS ENSAYOS

En este anexo se muestran los datos de humedad de las muestras de suelo obtenidas en los ensayos. En la primera tabla 8 se muestran los resultados correspondientes a los ensayos realizados en la zona seca, y en la segunda tabla 9 se muestran los resultados correspondientes a la zona húmeda.

Tabla 8. Humedad del suelo en ensayos de la zona seca.

Zona seca	Peso recipiente [g]	Recipiente+muestra [g]	Recipiente+muestra seco [g]	Muestra [g]	Muestra seco [g]	Agua perdida [g]	%
C0	1,66	244,18	212,59	242,52	210,93	31,59	13%
V0	5,33	272,25	226	266,92	220,67	46,25	17%
R0	5,24	231,4	201,62	226,16	196,38	29,78	13%
C1	16,95	79,3	68,46	62,35	51,51	10,84	17%
V1	24,03	89,62	78,93	65,59	54,9	10,69	16%
R1	25,13	81,16	72,51	56,03	47,38	8,65	15%
C2	104,02	161,23	150,61	57,21	46,59	10,62	19%
V2	24,46	103,87	85,4	79,41	60,94	18,47	23%
R2	25,7	110,14	94,99	84,44	69,29	15,15	18%
C3	16,95	68,32	58,2	51,37	41,25	10,12	20%
V3	24,43	80,24	68,32	55,81	43,89	11,92	21%
R3	25,7	83,65	73,1	57,95	47,4	10,55	18%
C4	16,96	70,63	59,13	53,67	42,17	11,5	21%
V4	24,42	88,98	76,58	64,56	52,16	12,4	19%
R4	25,71	89,06	76,12	63,35	50,41	12,94	20%

Tabla 9. Humedad del suelo en ensayos de la zona de precipitación.

Zona húmeda	Peso recipiente [g]	Recipiente+muestra [g]	Recipiente+muestra seco [g]	Muestra [g]	Muestra seco [g]	Agua perdida [g]	%
C1	105,09	183,05	167,05	77,96	61,96	16	21%
V1	25,68	90,9	78,4	65,22	52,72	12,5	19%
R1	23,25	90,99	78,67	67,74	55,42	12,32	18%
C2	24,01	102,54	87,28	78,53	63,27	15,26	19%
V2	23,3	111,07	91,64	87,77	68,34	19,43	22%
R2	25,17	66,8	58,07	41,63	32,9	8,73	21%
C3	24,13	75,69	64,15	51,56	40,02	11,54	22%
V3	23,33	98,3	82,36	74,97	59,03	15,94	21%
R3	25,14	82,6	70,36	57,46	45,22	12,24	21%
C4	24,12	87,15	74,7	63,03	50,58	12,45	20%
V4	23,32	88,37	74,56	65,05	51,24	13,81	21%
R4	25,15	70,78	60,61	45,63	35,46	10,17	22%